



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE HORMIGONES
CON ALTO CONTENIDO EN FINOS**

706-TES-CA-4887

Autor/a

Carla Saez Cereijo

Tutor/a

Antonio Aguado De Cea

Departament

Enginyeria de la Construcció (EC)

Intensificació

Tecnologia d'Estructures

Data

Novembre 2010

RESUMEN

Título: Caracterización mecánica de hormigones con alto contenido en finos

Autor: Carla Saez Cereijo

Tutor: Antonio Aguado

El hormigón convencional se obtiene como producto de mezclar mortero y áridos gruesos. En su caracterización mecánica intervienen muchos factores pasando por la calidad de sus materiales, el método utilizado en su mezcla, hasta las técnicas de ensayo usadas.

Los áridos, aproximadamente, constituyen $\frac{3}{4}$ partes del volumen total del hormigón, su combinación con otros elementos (agua, cemento y algunos aditivos) hacen que éste tenga unas u otras propiedades finales. La parte más fina de estos áridos, los finos, producen un relleno de bajo coste a la pasta de cemento, que permite reducir el costo económico de un hormigón convencional a parte de mejorar algunas de sus propiedades tanto en estado fresco como en el endurecido.

La actual Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08) admite para hormigones convencionales un máximo de 175 kg/m^3 de finos en las mezclas de hormigón. Aplicando esta limitación a uno de los hormigones más utilizados en edificación (HA-25) se ve coartada su utilización de cementos tipo II-A o II-B con adición caliza por superar dicho límite. En el caso de hormigones autocompactantes, la EHE-08 admite que el límite de contenido de finos sea superado hasta 250 kg/m^3 . Esta cantidad no significa ninguna merma en las propiedades mecánicas de hormigones de estas características.

La presente tesina propone caracterizar las propiedades mecánicas de un hormigón convencional que supere el límite fijado por la EHE-08 para hormigones autocompactantes. Una vez obtenidos los resultados, se pretende valorar si es posible un cambio en el límite propuesto por la EHE-08.

El estudio de esta tesina es una pequeña parte de la campaña experimental desarrollada por las empresas PROMSA, ESCOFET y el Laboratorio Técnico de Estructuras de la Universitat Politècnica de Catalunya entre los meses de Febrero y Julio de 2010 basada en una campaña previa para determinar las dos dosificaciones a utilizar.

Las dosificaciones utilizadas en la campaña experimental son dos, Patrón y Filler. En primer lugar se utiliza una muestra Patrón con contenido de finos de 175 kg/m^3 y por otro lado la dosificación a caracterizar con 275 kg/m^3 de finos. De esta manera se obtienen resultados para 2 tipos de hormigones, uno que cumple con el límite marcado por la EHE-08 y otro que lo supera, cosa que permitirá su comparación.

Para la caracterización mecánica del hormigón se han practicado los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo elástico y los pertinentes ensayos para la obtención de las deformaciones diferidas (retracción y fluencia).

Los resultados obtenidos muestran que todas las propiedades estudiadas se ven alteradas por este cambio en la dosificación. En particular se observa una disminución significativa en la resistencia a compresión y en el módulo de deformación del hormigón a diferencia de la resistencia a tracción que es menos sensible al aumento de finos. En relación a las deformaciones diferidas se produce una reducción en la retracción y un aumento en la fluencia.

Palabras clave: hormigón, finos, caracterización mecánica, deformaciones diferidas, campaña experimental

RESUM

Títol: Caracterització mecànica de formigons amb alt contingut en fins

Autora: Carla Saez Cereijo

Tutor: Antonio Aguado

El formigó convencional s'obté com a producte de barrejar morter i àrids gruixuts. En la seva caracterització mecànica intervenen molts factors passant per la qualitat dels seus materials, el mètode utilitzat en la seva mezcla, fins a les tècniques d'assaig utilitzades.

Els àrids, aproximadament, ocupen $\frac{3}{4}$ parts del volum total del formigó, la seva combinació amb altres elements (aigua, ciment i alguns additius) fan que aquest tingui unes o altres propietats finals. La part més fina d'aquests àrids, els fins, produeixen un farcit de baix cost a la pasta de ciment, que permet reduir el cost econòmic d'un formigó convencional a part de millorar algunes de les seves propietats tant en estat fresc com en l'endurit.

L'actual Instrucció Espanyola del Formigó Estructural (EHE-08) admet per a formigons convencionals un màxim de 175 kg/m^3 de fins a les barreges de formigó. Aplicant aquesta limitació a un dels formigons més utilitzats en edificació (HA-25) aquest veu coartada la seva utilització de ciments tipus II-A o II-B amb addició calcària per superar aquest límit. En el cas de formigons autocompactants, la EHE-08 admet que el límit de contingut de fins sigui superat fins a 250 kg/m^3 . Aquesta quantitat no significa cap minva en les propietats mecàniques del formigó d'aquestes característiques.

Aquesta tesina proposa caracteritzar les propietats mecàniques d'un formigó que superi el límit marcat per l'EHE-08 basant-se en el límit marcat en els formigons autocompactants. Un cop obtinguts els resultats, es valorarà si és possible un canvi en el límit proposat per la EHE-08.

L'estudi d'aquesta tesina és una petita part de la campanya experimental desenvolupada per les empreses PROMSA, ESCOFET i el Laboratori Tècnic d'Estructures de la Universitat Politècnica de Catalunya entre els mesos de febrer i juliol de 2010 basada en una campanya prèvia per determinar les dues dosificacions a utilitzar.

Per a la campanya experimental les dosificacions utilitzades són dos: Patró i Filler. En primer lloc s'utilitza una mostra Patró amb 175 kg/m^3 de fins i per un altre la dosificació a caracteritzar amb 275 kg/m^3 de fins. D'aquesta manera s'obtenen resultats per a 2 tipus de formigons, un que compleix amb el límit marcat per l'EHE-08 i un altre que el supera, cosa que permetrà la seva comparació.

Per a la caracterització mecànica del formigó, s'han practicat els assaigs de resistència a compressió, resistència a tracció, mòdul elàstic i els pertinents assajos per a l'obtenció de les deformacions diferides (retracció i fluència).

Els resultats obtinguts mostren que totes les propietats estudiades es veuen alterades per aquest canvi en la dosificació. En particular s'observa una baixada significant en la resistència a compressió i en el mòdul de deformació del formigó a diferència de la resistència a tracció que és menys sensible a l'augment de fins. En relació a les deformacions diferides es produeix una reducció en la retracció i un augment en la fluència.

Praules clau: formigó, fins, caracterització mecànica, deformacions diferides, campanya experimental

ABSTRACT

Title: Mechanical characterization of concrete with high fines content

Author: Carla Saez Cereijo

Tutor: Antonio Aguado

Conventional concrete is obtained as a result of mixing mortar and coarse aggregate. In its mechanical characterization many factors are involved, like the quality of the materials, how are they mixed during its fabrication and the techniques to test used.

Aggregates occupy approximately $\frac{3}{4}$ parts of the total concrete volume, its combination with other elements (water, cement and some additives) make it to have different properties at the end of its fabrication. The thinnest part of these aggregates, which is called fines, produce a low cost filler to the cement paste, which can reduce the economic cost of a conventional concrete and it can improve some concrete properties in both the fresh and the hardened.

The current Spanish Instruction of Structural Concrete (EHE-08) for conventional concretes supports a maximum of 175 kg/m^3 (or 185 kg/m^3 in case of using recycled water) of fines in concrete mixes. Applying this limitation to one of the most widely mix used in construction (HA-25) is hampering the use of type II-A or II-B with added limestone to overcome this limit. For the self-compacting concrete, the EHE-08 supports the fines content limit, exceeding up to 250 kg/m^3 . This amount does not mean any reduction in the mechanical properties of concrete with this characteristics.

This thesis is aimed to characterize the mechanical properties of concrete that exceeds the limit set by the EHE-08 based on the limit set in the self-compacting concrete, while if it is possible to assess whether a change in the limit proposed by the EHE-08.

The study of this thesis is part of the experimental campaign conducted by the companies PROMSA, ESCOFET and Structures Laboratory of the Technical University of Catalonia between February and July 2010 based on a previous campaign to determine the two dosages used.

The dosages used during the experimental campaign are two: 175 kg/m^3 as standard sample and 275 kg/m^3 as Fines sample. This way we will get results for 2 types of concrete, one that complies with the limit set by the EHE-08 and the second which overpass this limit, this will enable the comparison between the two samples.

For the mechanical characterization the most significant mechanical tests have been carried out: compressive strength, tensile strength, elastic modulus and the appropriate tests to obtain deferred deformations (shrinkage and creep).

The results show that all the properties studied were affected by this change in the dosage. In particular there is a significant drop in compressive strength and modulus of concrete, not as tensile strength that is less sensitive to the increase of fines. In relation to deferred deformation there is a reduction in shrinkage and an increase in flow.

Key words: concrete, fines, mechanical characterization, deferred deformation, experimental campaign

AGRAÏMENTS

Aquesta tesina és el resultat d'uns mesos de treball que sense l'ajuda i el suport d'algunes persones no haguèss estat possible la seva realització, per això, i segons el meu parer, es mereixen encara que sigui un petit esment en el present document.

En primer lloc, donar les gràcies al amic i professor Antonio Aguado, culpable de que iniciés els meus estudis a l'Escola de Camins i culpable també, d'ajudar-me a acabarlos. A les empreses i laboratoris que han estat presents al llarg de la realització d'aquesta tesina i les quals ja es fa esment al llarg del document i finalment a la família, als amics i en especial al "equip cc" sense el qual moltes de les hores dedicades a aquest treball, mai haguèssin existit.

Gràcies,

Carla

ÍNDICE

CAPÍTULO 1:INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1.Introducción	1
1.2.Objetivos	3
1.3.Metodología	3
CAPÍTULO 2:ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	5
2.1.Introducción	5
2.2.Hormigón Fresco.....	6
2.2.1 Compacidad.....	7
2.2.2 Consistencia	8
2.2.3 Docilidad	8
2.2.4 Homogeneidad.....	9
2.2.5 Relación agua/cemento (a/c)	10
2.3.Hormigón endurecido	10
2.3.1 Resistencia a compresión	11
2.3.2 Resistencia a tracción	13
2.3.3 Modulo de deformación longitudinal.....	14
2.4.Deformaciones Diferidas	16
2.4.1 Retracción.....	16
2.4.2 Fluencia	17
2.5.Tratamiento Normativo.....	18
2.5.1 Evolución	18
2.5.2 Actual.....	24
2.6.Conclusiones	27
CAPÍTULO 3:PROGRAMA DE TRABAJO	29
3.1.Introducción	29
3.2.Definición de la campaña Experimental	30

3.2.1 Ensayos sobre el hormigón.....	30
3.3.Dosificación de Partida.....	36
3.3.1 Fabricación de las probetas	37
3.3.2 Resultados en estado fresco.....	38
3.3.3 Resultados en estado endurecido	39
CAPÍTULO 4:RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	43
4.1.Introducción	43
4.2.Dosificaciones Reales	44
4.2.1 Fabricación de las probetas	46
4.3.Resultados hormigón endurecido.....	48
4.3.1 Resistencia a compresión	49
4.3.2 Resistencia a tracción	53
4.3.3 Módulo de elasticidad	54
4.4.Deformaciones Diferidas	55
4.4.1 Retracción.....	56
4.4.2 Fluencia	59
CAPÍTULO 5:CONCLUSIONES	63
5.1.Introducción	63
5.2.Conclusiones generales	64
5.3.Conclusiones específicas.....	65
5.4.Futuras líneas de investigación	66
CAPÍTULO 6:BIBLIOGRAFIA	67
Anejo A.....	71
Anejo B.....	77
Anejo C.....	101

Índice de Tablas y Figuras

Índice de figuras

Figura 2. 1. Fisuras de adherencia:.....	13
Figura 2. 2. Curva tensión - deformación del hormigón (Fuente: Neville, 1996)	14
Figura 3. 1. Curva σ - ϵ según f_{ck}	15
Figura 3. 2. Ensayo de Penetración de agua. a) probetas en los moldes para el ensayo, b) ensayo	32
Figura 3. 3. Distribución Normal, Campana de Gauss	33
Figura 3. 4. Bastidor de carga.....	36
Figura 3. 5. Curado de las probetas.....	38
Figura 3. 6. Resistencia media a compresión a 7 y 28 días	40
Figura 4. 1. Hormigonado(a) y compactación (b) de las vigas de la dosificación PT ...	44
Figura 4. 2. Vigas prefabricadas de hormigón de la dosificación PT	45
Figura 4. 3. Probetas usadas para la dosificación PT	46
Figura 4. 4. Llenado de las probetas de la dosificación FL.....	48
Figura 4. 5. Resistencia media a compresión.....	50
Figura 4. 6. Evolución de E_c con el tiempo.....	55
Figura 4. 7. En sentido horario a) detalle de la probeta, b) medición a la llegada al LTE, c) peso de la probeta, d) medición durante la carga	56
Figura 4. 8. Retracción des de la llegada de las probetas al LTE.....	58
Figura 4. 9. Retracción des de la entrada de las probetas en cc.....	59
Figura 4. 10. Velocidad de deformación por fluencia PT y FL	61

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Clasificación de los áridos según su tamaño.....	2
Tabla 2. 1. Pérdida de resistencia en función del porcentaje de contenido de arcilla. (Urreta, 1986)	21
Tabla 2. 2. Valores del ensayo del EA en las diferentes instrucciones.....	22
Tabla 2. 3. Valores del ensayo de AM para las diferentes instrucciones	23
Tabla 2. 4. Contenido máximo de fino de las diferentes instrucciones	24
Tabla 2. 5. Contenido máximo de finos en los áridos	25
Tabla 2. 6. Huso granulométrico del árido fino	26
Tabla 3. 1. Resumen campañas realizadas	30
Tabla 3. 2. Dosificaciones utilizadas en los trabajos previos	37
Tabla 3. 3. Valores medios de los ensayos de penetración de agua en mm	41
Tabla 4. 1. Dosificaciones utilizadas en las diferentes series	46
Tabla 4. 2. Ensayos especificados por la EHE-08.....	47
Tabla 4. 3. % que pasa para la fracción 0/4 y requisitos de la EHE-08	47
Tabla 4. 4. % que pasa para la gravilla y la grava.....	47
Tabla 4. 5. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días	49
Tabla 4. 6. Resultados de f_c y E_c obtenidos por el departamento de Materiales de Construcción de la UPC.....	51
Tabla 4. 7. Resultados de penetración de agua y succión capilar obtenidos por el departamento de Materiales de Construcción de la UPC.....	51

Tabla 4. 8. Comparación resultados PROMSA y LTE	51
Tabla 4. 9. Resistencia a tracción	53
Tabla 4. 10. Relación resistencias a 28 días	53
Tabla 4. 11. Valores de los módulos de deformación.....	54
Tabla 4. 12. Valores de la retracción de la dosificación PT	57
Tabla 4. 13. Valores de la retracción de la dosificación FL	57
Tabla 4. 14. . Deformación por fluencia de PT	60
Tabla 4. 15. Deformación por fluencia de FL	60

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La aparición de cemento portland, data del 1824 de la mano de Joshep Aspdun, desde entonces el hormigón se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en la construcción tanto por sus prestaciones como por la relación coste/beneficio.

El hormigón está formado por áridos en 70 – 80 % de su volumen, no es de sorprender pues, su importancia en la calidad de éste. El árido influye no sólo en la resistencia, sino que también tiene mucha importancia en la puesta en obra y la durabilidad.

Llamamos árido al material granulado inerte, formado por fragmentos de roca. Estos áridos se incorporan al hormigón en distintas formas y distintos tamaños. Coloquialmente son conocidos como arena, gravilla, grava (Luaces, 2007).

Los áridos se pueden clasificar según diferentes aspectos, pero el que nos interesa con relación a ésta tesina principalmente es su tamaño. En relación al hormigón los áridos se clasifican en tres grupos: las gravas que generalmente comprenden los áridos entre 8 – 20 mm, las gravillas que comprenden los tamaños de 4 – 8 mm y las arenas entre 0,080 – 5 mm. A éstos dos grupos también se les

conocen como árido grueso los dos primeros y árido fino al tercero. El tamaño máximo que se utiliza generalmente en las gravas es 20 mm, aunque en ingeniería civil se pueden llegar a permitir tamaños de 32, 40 e incluso 120 mm para obras como las presas.

Tipo de árido	Arena (a)	Gravilla (g)	Grava (G)
Husos (mm)	0 - 4	4 - 8	8 - 20

Tabla 1. 1. Clasificación de los áridos según su tamaño

Pero en el hormigón también se hace uso de otros tipos de áridos principalmente de origen calizo que pasan por el tamiz 0,080 bien sea por qué están contenidos en el árido grueso, el árido fino o en el propio cemento. Estos tipos de áridos son conocidos como finos o filler o incluso adición caliza y su comportamiento en el hormigón es distinto, no tan sólo por el diámetro de las partículas, sino también por su composición química, mineralógica... (Fernández, 1980).

Uno de los hormigones que hace uso de este último tipo de áridos es el hormigón autocompactante (HAC). El HAC, contiene, en relación a otros hormigones, mayor contenido de finos (cementos, áridos y adiciones en un 23 - 40% del peso total del hormigón) (www.construmatica.com) y fluidificantes que le confieren la fluidez requerida para que pueda ser vaciado por su propio peso y a la vez sea capaz de rellenar los encofrados sin vibración, consiguiendo una buena consolidación sin producirse exudación ni segregación.

La actual Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08) admite para HAC un contenido en finos de hasta 250 kg/m^3 , y se amplía la cantidad máxima de finos en los hormigones convencionales hasta 185 kg/m^3 en el caso de uso de agua reciclada y se mantiene la limitación de 175 kg/m^3 en el resto de casos.

En los hormigones más utilizados en edificación (HA-25 en ambiente tipo II), esta limitación en el contenido en adición caliza, coarta la utilización de cementos tipo II/A y II/B con adición de adición caliza (L o LL). En una dosificación habitual de estos hormigones, su contenido en cemento rondará los 300 kg/m^3 de los cuales entorno a los 140 kg/m^3 provienen de la parte más fina de los áridos.

En el caso de utilizar un cemento tipo II/A-L o LL, su aportación en adición caliza será (suponiendo un contenido de adición del 16%, $300\text{kg} \cdot 0,16 = 48 \text{ kg}$) 48 kg. En el caso de utilizar un cemento tipo II/B-L o LL, su aportación en adición caliza será (suponiendo un contenido de adición caliza del 25%, $300\text{kg} \cdot 0,25 = 75 \text{ kg}$) 75 kg.

En ambos casos se invalida la utilización de estos tipos de cementos al sobrepasar el límite de los 175 kg/m^3 marcado por la EHE-08:

- cemento II/A-L $140 \text{ kg} + 48 \text{ kg} = 188 \text{ kg} > 175 \text{ kg}$
- cemento II/B-L $140 \text{ kg} + 75 \text{ kg} = 215 \text{ kg} > 175 \text{ kg}$

Al haberse comprobado que en hormigones autocompactantes este límite de finos se sobrepasa holgadamente sin ningún tipo de merma en sus propiedades mecánicas de durabilidad y estructurales, esta tesina propone estudiar el comportamiento de hormigones habituales en edificación, que sobrepasen esta limitación de 175 kg/m^3 en contenido de adición caliza total.

1.2 OBJETIVOS

En base a lo anterior el objetivo principal de esta tesina es estudiar el comportamiento de uno de los hormigones más habituales utilizados en edificación (HA-25) con un contenido en adición caliza mayor al actualmente permitido por la Instrucción EHE-08.

Para llegar al objetivo principal de este estudio científico se deberá pasar por varios puntos entre los que destacan:

- Dar una visión de las funciones de los finos tanto en el hormigón fresco como en el hormigón endurecido
- Analizar la evolución de la normativa en relación al contenido de áridos finos en las mezclas de hormigón hasta la presente instrucción
- Fabricar dos tipos de hormigones con el cemento utilizado más habitualmente en construcción con dos contenidos diferentes de filler uno dentro de la norma actual (EHE-08) 175 kg/m^3 y otro muy por encima de la norma establecida 275 kg/m^3 pero que el resto de sus componentes (cemento, árido y aditivos) sean iguales.
- Realizar ensayos para caracterizar mecánicamente los dos hormigones fabricados, analizar los resultados de los ensayos realizados y comprobar si éstos dan pie a un posible cambio en la normativa actual

1.3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos se han realizados distintos trabajos que dan forma a esta tesina estructurada en 6 capítulos y 3 anejos, el primero de ellos corresponde a esta Introducción. A continuación se describe la metodología seguida.

En el **Capítulo 2** se aporta una panorámica general sobre el estado de conocimiento actual de la aportación de los finos en las propiedades de los hormigones convencionales en las distintas edades: fresco y endurecido y una visión sobre cómo ha evolucionado la normativa española en relación a la cantidad de finos permitida hasta la actual instrucción.

Tras el estado del conocimiento sobre los diferentes aspectos del aumento de finos en hormigones convencionales, en el **Capítulo 3** se presenta el programa de

trabajo seguido, señalando los materiales, equipos e instalaciones utilizados en la campañas experimentales realizadas así como las dosificaciones empleadas en cada caso con objeto de favorecer la reproducibilidad de estos ensayos, independientemente de las personas, el lugar, o el tiempo, principio básico de cualquier investigación. La primera campaña tuvo lugar en Julio del año 2009 en los laboratorios de PROMSA con el objeto de tener una referencia y acertar mejor en la posterior dosificación y ensayos en el Laboratorio Técnico de Estructuras (LTE) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Como ya se ha comentado anteriormente para la realización de las probetas se utilizó un hormigón HA-25 para ambiente tipo II (humedad alta) ya que es uno de los más usados en construcción.

En el **Capítulo 4** se presentan los resultados de la campaña experimental realizada en el LTE en función de la propiedad estudiada en cada ensayo como son la resistencia a compresión, resistencia a tracción, el modulo elástico, la fluencia i la retracción. Las dosificaciones utilizadas fueron de 175 kg/m^3 para la muestra patrón y 275 kg/m^3 para la muestra estudio.

En el **Capítulo 5** se encuentran las conclusiones finales después de analizar los resultados obtenidos en el capítulo anterior comparándolos con los objetivos marcados al inicio de esta tesina. Finalmente en el apartado de referencias bibliográficas del **Capítulo 6** se recogen las fuentes bibliográficas consultadas en el transcurso de la presente tesina

Finalmente los **Anejos A, B y C** aportan información complementaria sobre los materiales utilizados y los resultados parciales obtenidos

CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Los efectos de los áridos finos en el hormigón son muchos y muy variados, y han sido comentados a lo largo de la evolución del hormigón por numerosos autores.

Los áridos finos ejercen en el hormigón una acción directa según las características propias del mismo sobre su resistencia estructural, porosidad, elasticidad, dureza, tamaños, textura, estructura, composición, constitución y las impurezas que pueda contener. Su acción indirecta dependerá de su granulometría, forma de las partículas y compacidad, por el agua requerida para la trabajabilidad de los hormigones preparados (Fernández, 1980)

Las funciones de los áridos en el hormigón son muchas, las más destacables para el árido fino son las siguientes:

- Resistir esfuerzos interiores y externos
- Resistir la abrasión
- Resistir el paso de la humedad

- Resistir solicitaciones químicas
- Dar trabajabilidad a las mezclas
- Evitar o reducir las grietas que se producen por contracción en el endurecimiento de las pastas de cemento y por cambios de contenido de humedad (retracción)
- Disminuir el coste económico del hormigón proveyendo relleno de bajo costo a la pasta de cemento
- Evitar la fisuración

En el presente capítulo se quiere dar una visión sobre la influencia de los finos en algunas de las propiedades que se consideren más afectadas por éstos del hormigón, así se estudia en primer lugar el hormigón fresco y el hormigón endurecido y las propiedades de ambos desde el punto de vista de la influencia de los finos y posteriormente se tratan los áridos desde el punto de vista normativo.

2.2 HORMIGÓN FRESCO

Para entender el comportamiento de los finos en el hormigón es necesario conocer de qué está compuesto. El hormigón tiene dos componentes principales: árido grueso y mortero.

El esqueleto granular del árido es el elemento natural que aporta resistencia al hormigón mientras que el mortero es el artificial que influye sobre las propiedades reológicas y mecánicas de éste. El porcentaje en que se mezclan estos dos componentes es muy variado estando entre valores del 60 – 75 % del volumen total para los áridos. En consecuencia las propiedades finales del hormigón vienen condicionadas por este porcentaje.

El mortero es la mezcla de agua, cemento, áridos finos (inferiores a 5 mm) y un cuarto componente que son los aditivos. La pasta que forman estos materiales envuelve y aglutina los áridos gruesos. Cuando los finos no se encuentran recubriendo los granos de arena sino que están dispersos en la misma, se integran en el mortero matriz del hormigón, formando parte de la pasta agua cemento. Ésta pasta ocupa un volumen absoluto en el hormigón (sin aire atrapado u ocluido) que varía entre el 77 y el 52 % del volumen total (Fernández, 1980).

Al juntar el cemento con el agua, éste se hidrata iniciando complejas reacciones químicas que lo convierten un producto maleable con buenas propiedades adherentes, que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla. El hormigón fresco es el hormigón de las primeras edades cuando todavía no ha endurecido, este período dura hasta que el hormigón deja de ser deformable o fluido. En definitiva el hormigón se comporta como un líquido con una cierta viscosidad y tensión tangencial hasta el endurecimiento de la pasta.

Para tener un hormigón endurecido resistente y duradero es importante controlar las principales características del hormigón fresco, que son la compacidad, la consistencia, la manejabilidad y la homogeneidad (González Martínez, 1992).

2.2.1 Compacidad

La compacidad (C) es el cociente entre el volumen real (V_R) y el volumen aparente (V_a) del hormigón fresco. Representa el volumen de sólidos en una unidad de volumen.

$$C = \frac{V_R}{V_a} \quad [2.1]$$

Relacionado con la compacidad encontramos su complemento, la oquedad, que es el volumen de huecos por unidad de volumen aparente.

En general es imposible obtener un hormigón completamente compacto. Con dosificaciones adecuadas y una compactación idónea debería llegarse a compacidades del 97-98 %, aunque normalmente ésta gira en torno al 90% (Neville, 1996).

El nivel de compacidad está relacionado pues con el nivel de huecos que existe en la mezcla. Un alto nivel de compacidad nos da un hormigón con un índice muy reducido de huecos en su granulometría.

La granulometría se refiere al intento de, optimizando el contenido de cemento en el hormigón, establecer la mejor forma de mezclar las partículas de árido de distinto diámetro para tener la máxima compacidad, es decir el mínimo volumen de aire en el interior.

Existen autores que clasifican la granulometría en continua y discontinua en función de la uniformidad del conjunto de áridos usados, en cambio otros usan la clasificación granulometría fina o gruesa haciendo referencia al mayor porcentaje de tamaño de árido, en la granulometría gruesa tendrán mayor importancia los áridos de mayor tamaño, produciendo así hormigones de mayor resistencia que en los hormigones de granulometría fina.

Feret estableció que la resistencia del hormigón depende del tamaño del árido y de la compacidad. Ya se ha comentado antes que se deben combinar distintos tamaños de árido para que queden llenos todos los huecos, pero se debe hacer la mezcla de forma concreta (Neville, 1996).

Las arenas que dan la máxima compacidad no son las que propocionan los hormigones más trabajables, por ello se establecen límites entre los cuales pueden moverse las proporciones de los distintos tamaños de granos para su empleo en hormigones (Fernández, 1980). Hay que tener en cuenta que a igualdad de consistencia, la disminución del porcentaje de finos de la arena supone una disminución media del 1,2% en la densidad, o lo que es lo mismo 12 litros de aire ocluido por metro cúbico: una mayor porosidad del hormigón, y por consiguiente, la disminución de compacidad que se acusa con nitidez en el descenso de resistencias. La eliminación total de finos implica la aparición de poros no atribuibles ya a la pérdida

de agua de interposición, sino más bien a un peor ajuste granulométrico de toda la fase sólida entre la que debe contarse el cemento (González Martínez, 1992).

En resumen, la máxima compacidad nos dará una máxima resistencia, ésta depende, principalmente, de la granulometría del árido y de otras características como la cantidad de agua de amasado, del tipo de árido, de la puesta en obra (González, 1992) y del aire ocluido en su interior (porosidad).

2.2.2 Consistencia

La consistencia es la facilidad que posee el hormigón fresco para mantener la forma. Depende principalmente del agua del amasado pero se ve influenciada por otros factores como la granulometría, la forma del árido y la dosificación de cemento (González, 1992).

El módulo de finura (MF) se puede utilizar como juicio para decidir si un árido es apto o no para el empleo en hormigones (Fernández, 1980). El módulo de finura es un índice de la finura del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será éste. Según la American Section of the International Association for Testing Materials (A.S.T.M.) se considera que el MF de una arena adecuada para hormigón debe estar entre 2 y 3,1, un valor menor que 2,0 indica una arena fina, 2,5 una arena de finura media y 3,0 una arena gruesa (Romo Proaño, 2009).

Como veremos más adelante el uso de más finos aumenta la superficie específica del hormigón, hecho que requiere más agua para obtener una misma consistencia. En los estudios realizados por Fernández (1980), se observó que una variación del módulo de finura de + 0,2 reduce o de -0,2 aumenta el % de agua de amasado en 1,3 %. La variación del contenido de agua para reducir o aumentar 1 cm de asentamiento varía de 1,0 a 2,8 % (Fernández, 1980).

2.2.3 Docilidad

La docilidad o manejabilidad se definen como la idoneidad de un hormigón para adaptarse a formas determinadas con los medios de compactación de los que se dispone. Está relacionada con la deformabilidad (consistencia), la homogeneidad de los diferentes componentes y con la facilidad que presenta el hormigón para evacuar el aire de su interior obteniendo su compacidad máxima. (González Martínez, 1992)

La presencia de finos favorece la manejabilidad de los hormigones, estimada mediante la medida de su consistencia y relacionada con la facilidad que poseen para la eliminación parcial o total del aire ocluido (González Martínez, 1992), ya que como se ha dicho anteriormente, la presencia de finos reduce la prosidad al rellenar los huecos que quedan entre los áridos grandes adaptando mejor así cualquier forma que se le quiera transmitir ya que por su forma y tamaño estos no quedan trabados.

La pasta agua-cemento produce un efecto primordial en la trabajabilidad del hormigón y en la exudación. La exudación del hormigón es un fenómeno que se produce por el ascenso del agua de amasado de una mezcla de hormigón fresco, es una forma de segregación de los componentes de una mezcla de hormigón fresco en

la que el agua tiende a elevarse hacia la superficie del hormigón como consecuencia de la incapacidad de los áridos de arrastrarla con ellos al irse compactando.

Un hormigón con falta de finos o preparado con arenas de tamaño uniforme presenta gran exudación:

- a un hormigón con bajo contenido de cemento en la pasta agua/cemento y bajo contenido de finos se le añade material fino pulverizado, su efecto será beneficioso para la trabajabilidad y reducción de la exudación. Su efecto se produce al evitar la exudación, reduciendo la cantidad de agua que pueda almacenarse debajo de los áridos gruesos, así como distribuyendo la porosidad en la masa del hormigón, o sea aumentando la retención del agua del mortero en el hormigón (Fernández, 1980)
- si el hormigón es rico en cemento, y los áridos están mal graduados, la adición de finos pulverizados puede ser perjudicial, ya que se aumenta la superficie específica con el aumento de agua necesaria para la misma trabajabilidad (Fernández, 1980)
- para contenidos de agua bajos (consistencia seca), la adición de finos no mejora la manejabilidad, sino que la empeora (Bertrand, 1968), ya que el agua existente deberá ser utilizada para hidratar al hormigón, pero como ya se ha comentado anteriormente, el aumento de finos también aumenta la demanda de agua. Para entender éste punto tenemos que pensar en la relación a/c de una dosificación dividida en dos partes, una parte fija que se utilizará para hidratar la mezcla y otra que nos dará la trabajabilidad. Así si por ejemplo tenemos una a/c de 0,4-0,5 de éstos aproximadamente 0,25 será para hidratar la mezcla el restante 0,2 – 0,25 nos dará la correspondiente trabajabilidad.
- para una cierta cantidad de agua (consistencia plástica), la incorporación de finos va a mejorar sensiblemente y rápidamente la manejabilidad (Bertrand, 1968)

La presencia de finos en los hormigones incide directamente en favorecer la docilidad, con lo que su reducción perjudica en última instancia a la resistencia alcanzada, debido a que el grado de compactación es inferior. A igualdad de energía de compactación y de consistencia, la presencia de finos es favorable (González Martínez, 1992).

2.2.4 Homogeneidad

La homogeneidad es la distribución uniforme de los elementos que componen la masa del hormigón. Es importante ya que todos los principios teóricos del hormigón se basan en que es un material homogéneo. Además si la masa estuviera segregada sería imposible conseguir su máxima compactación.

Depende de la cantidad de agua de amasado, de la puesta en obra y del sistema de compactación usado (González, 1992). Por otro lado, una gran concentración de finos, puede dar lugar a segregación de la masa de hormigón, por el

simple hecho de que los áridos gruesos tienen mayor densidad a los finos y por gravedad se depositaran en el fondo dejando los áridos finos arriba.

2.2.5 Relación agua/cemento (a/c)

Si bien la relación a/c no es una propiedad del hormigón fresco, como se puede comprobar al largo de los siguientes apartados, es una variable muy importante en la dosificación del hormigón, y que influye en muchas de las propiedades tanto del hormigón fresco (consistencia, docilidad...), como en las del hormigón endurecido (resistencia, retracción...).

Una relación a/c baja permite obtener hormigones de mayores resistencias que una relación a/c alta, si bien a mayor relación a/c más trabajabilidad obtendremos. Se considera que la relación mínima para obtener hidratar todos los componentes del cemento es 0,25 como término medio en los diferentes tipos de cemento. Si bien se necesita, usualmente, valores mayores para poder trabajar.

La relación agua/cemento aumenta con el aumento progresivo en finos según los estudios realizados por Urreta (1986), el motivo reside en el aumento de superficie específica al aumentar el contenido de finos. La superficie específica, es una propiedad de los sólidos la cual es la relación entre el área superficial total y la masa del sólido. Añadiendo finos al hormigón, aumentamos el área superficial más que el volumen, ya que como ya se ha comentado estos ocupan los huecos que existen entre los áridos gruesos. Al aumentar la superficie específica, el agua necesaria para mojar a todos los áridos también aumenta.

2.3 HORMIGÓN ENDURECIDO

El fraguado es la fase inicial de hidratación, y se caracteriza por el paso de la pasta en estado fluido al estado sólido, una vez se produce el fraguado es cuando podemos hablar de hormigón endurecido.

A partir de este punto las reacciones de hidratación alcanzan los constituyentes del cemento que todavía no se han hidratado provocando el completo endurecimiento de la masa. Éste proceso se caracteriza por un progresivo desarrollo de las resistencias mecánicas. Aunque hablemos de dos procesos separados (fraguado y endurecimiento) solo existe un único proceso de hidratación continuo.

El endurecimiento no tiene fases definidas, el cemento en polvo y sus partículas se hidratan progresivamente por contacto del agua con la superficie de las partículas formando algunos compuestos cristalinos y una gran parte de compuestos microcristalinos asimilables a coloides que forman una película en la superficie de la partícula del cemento. A partir de entonces el endurecimiento continúa dominado por estas estructuras coloidales que envuelven los granos del cemento y a través de las cuales progresa la hidratación hasta el núcleo de la partícula.

El fraguado en condiciones normales empieza entre 30 y 40 minutos después de que el hormigón haya quedado en reposo en los moldes, y termina transcurridas las

10 o 12 horas, tiempo tras el cual empieza el endurecimiento, el cual lleva un ritmo rápido los primeros 28 días, para después aumentar lentamente hasta llegar al año que se estabiliza.

Las características resistentes del hormigón son diversas, pero a última instancia lo que caracteriza más a un hormigón es su resistencia a compresión, dato que permite suponer con una aproximación razonable otros aspectos del comportamiento mecánico del material.

2.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de hormigón a carga axial.

Una de las preocupaciones al largo de la historia del hormigón, ha sido la naturaleza de los finos por su influencia en las características del hormigón, así pues, estudios realizados muestran que la arcilla de las arenas calizas resulta muy perjudicial para la resistencia tanto a tracción como a compresión (Ramírez, y otros, 1985).

Los finos con coeficientes de actividad puzolánica baja (entendemos como coeficiente de actividad puzolánica la capacidad de los finos para reaccionar ante el agua) mejoran la resistencia a compresión a diferencia de la resistencia a tracción que se muestra menos influida (Bertrand, 1968). Lo que hace caer las resistencias es la proporción de arcilla dentro de los finos, el efecto de la arcilla es tanto más acusado cuanto mayor es el contenido total en finos (Oroviogicoechea, 1981). El problema reside en que las arcillas poseen una mayor superficie específica a igual tamaño que las calizas, así pues la demanda de agua es superior.

Según Neville (1996), la resistencia a compresión depende principalmente de:

- la relación *a/c*: el aumento de finos aumenta la demanda de agua para su amasado ya que aumenta la superficie del árido a mojar. Este incremento implica que para obtener igual docilidad, serán necesarias mayores cantidades de agua aumentando la relación agua/cemento y disminuyendo por tanto su resistencia
- *nivel de compactación* (a mayor compactación mayor resistencia)
- *cantidad de cemento* (a mayor cantidad de cemento mayor resistencia)
- *granulometría de los áridos*: el árido grueso es el que proporciona la resistencia al hormigón. El uso de una granulometría gruesa o fina influirá en la resistencia final. Emplear una granulometría gruesa en vez de fina produce una mejora en la resistencia para iguales condiciones de plasticidad (Ramírez, y otros, 1985)

Desde el punto de vista práctico, la relación agua/cemento es el factor que más influencia tiene en la resistencia del hormigón totalmente compactado. La relación agua/cemento determina la porosidad del cemento endurecido en cualquier momento de su hidratación. La razón la encontramos en que la presencia de huecos en el

hormigón reduce grandemente su resistencia. (González Martínez, 1992). La ley de Feret relaciona la resistencia con la suma de los volúmenes de agua y aire en la pasta endurecida (Neville, 1996)

$$f_{ck} = k \left(\frac{c}{c+e+a} \right)^2 \quad [2.2]$$

donde: f_{ck} resistencia a compresión del hormigón
 c: volumen absoluto de cemento
 e: volumen absoluto de agua
 a: volumen absoluto de aire
 k: constante

Como podemos observar la resistencia del hormigón está influenciada principalmente por el volumen total de huecos: aire ocluido, poros capilares, poros de gel y aire introducido. Es frecuente encontrar a los finos formando una delgada capa sobre la superficie de los áridos de tamaño mayor, reduciendo de este modo la adherencia entre la pasta del mortero y el árido grueso (González Martínez, 1992).

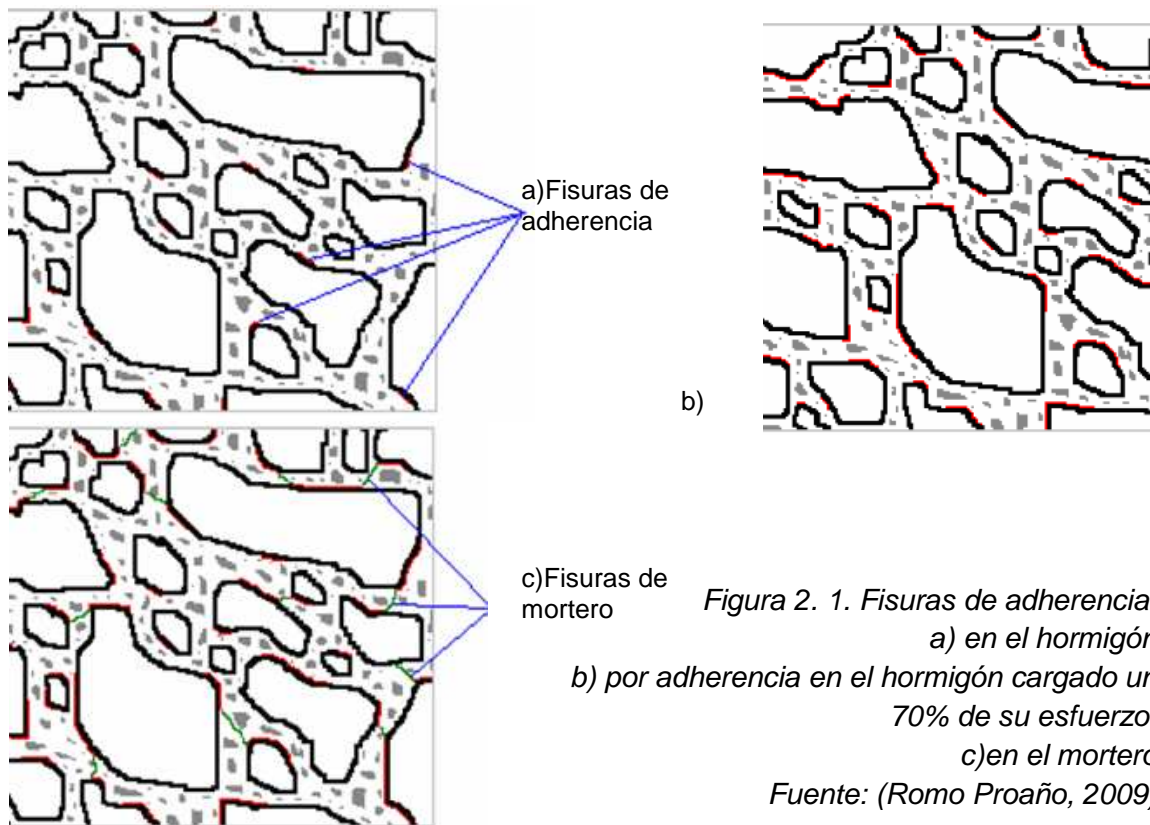
La adherencia entre el árido grueso y la pasta del mortero es importante para la resistencia a compresión. Todos los hormigones, cuando no están cargados, presentan un número limitado de fisuras de adherencia entre el árido grueso y el mortero, tal y como podemos ver en la Figura 2.1 a), como producto de la retracción durante el fraguado.

Cuando estos mismos hormigones se someten progresivamente hasta un 70% de su esfuerzo de rotura (Dopico, y otros, 2008), se incrementan casi linealmente las fisuras de adherencia tanto en número como en longitud como se puede ver en la Figura 2.1. b), lo que añadido a la deformabilidad de los materiales permite mantener una relativa linealidad entre los esfuerzos y las deformaciones (Rromo Proaño, 2009).

Cuando los esfuerzos se aproximan al 90% del esfuerzo de rotura, las fisuras de adherencia crecen exponencialmente, y aparecen fisuras de mortero que unen las fisuras de adherencia, lo que conduce a rajaduras continuas que terminan produciendo la rotura del hormigón. En la Figura 2. 1. c) se pueden observar dichas fisuras de mortero. Este proceso de fisuración se traduce en un comportamiento inelástico del hormigón en ese rango de esfuerzos (Rromo Proaño, 2009).

Estudios realizados por González Martínez (1992) demuestran que la reducción de finos, supone normalmente una cierta disminución de resistencia, aunque esta afirmación debe ser matizada en función de la cuantía de la disminución.

Bertrand (1987) cuando utiliza finos con bajo índice de actividad puzolánica, consigue incrementar la resistencia hasta llegar al 8% de finos totales, que era el máximo que utilizaba. Indica incluso que esta tendencia puede mantenerse hasta el 12%. Aunque si el índice de actividad es alto se observa una caída apreciable de la disminución de resistencia. En cambio, Urreta (1996), en su estudio sobre la influencia de los finos de las arenas calizas en el hormigón señala que para contenidos elevados de finos entre el 20 y el 25 % los descensos de resistencia son graduales sin que pueda considerarse un empeoramiento acelerado de la calidad resistente.



2.3.2 Resistencia a tracción

La principal característica estructural del hormigón es su resistencia a esfuerzos de compresión, en cambio la resistencia a tracción solo llega a valores aproximados, del 8% al 12%, de su resistencia a compresión.

La resistencia a tracción, según Delibes (1987), es más sensible que la resistencia a compresión a la forma y textura de los áridos. En la resistencia a compresión, el efecto beneficioso de la irregularidad del árido es compensado por la mayor necesidad de agua exigida para la misma consistencia, así pues manteniendo el efecto de la consistencia, el beneficio en tracción, a igualdad de relación agua/cemento lo compensa sobradamente.

Así como el contenido de huecos es uno de los principales factores que pueden alterar la resistencia a compresión, nos encontramos en que la resistencia a tracción se ve alterada principalmente por la adherencia entre el árido y el mortero. Como se ha comentado en el apartado anterior una gran concentración de finos, puede hacer que estos se agrupen formando una delgada capa sobre la superficie de los áridos (González Martínez, 1992), así pues, pueden reducir la adherencia entre el mortero y el árido grueso.

Por otra parte Bertrand (1987) encuentra que en sus estudios los valores obtenidos sobre las resistencias a la tracción están mucho más agrupadas que las

resistencias a la compresión, y que por ello el parámetro más sensible al contenido de elementos finos es la resistencia a la compresión, al contrario de las ideas admitidas habitualmente. Sin embargo, Maurer y Weber obtienen que la resistencia a la flexión es netamente decreciente con el incremento de finos, mientras que la resistencia a compresión no está influida apenas por el aumento de partículas finas (Urreta, 1986).

2.3.3 Módulo de deformación longitudinal

El hormigón no es un material elástico, no podemos hablar de un módulo de elasticidad como se hace en otros materiales, sino que es más conveniente hablar de un módulo de deformación, que nos relaciona las deformaciones del hormigón con las cargas aplicadas.

Hay autores como Neville (1996) y Kumar Metha (1986) que dividen el módulo de deformación en 3 zonas diferentes como se puede ver en el diagrama tensión – deformación del hormigón en la Figura 2.2.

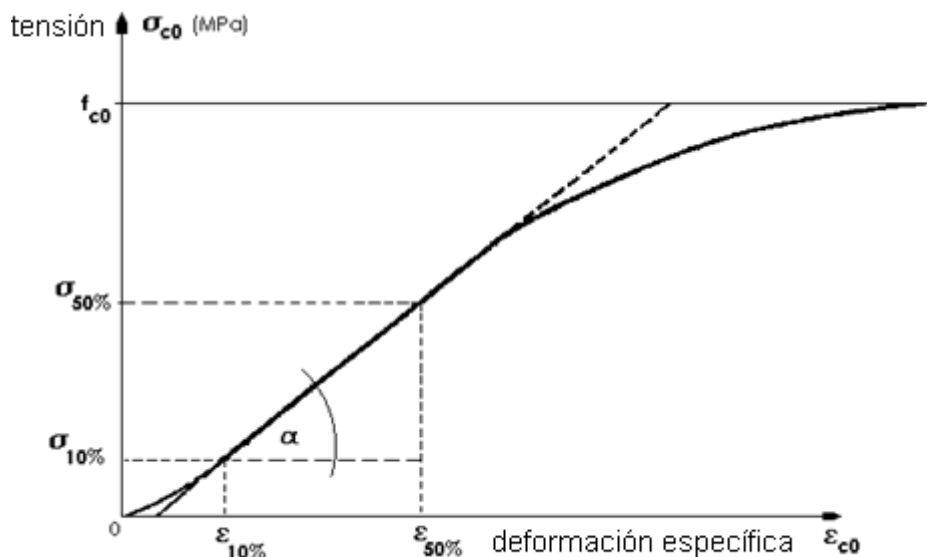


Figura 2. 2. Curva tensión - deformación del hormigón (Fuente: Neville, 1996)

- **Módulo Tangente:** la pendiente de la curva de tensión – deformación en cualquier punto
- **Módulo Secante:** pendiente de una recta que va desde el origen O hasta un punto que corresponde al 50% de la tensión de rotura.
- **Módulo Cuerda:** pendiente que va entre 2 puntos de la curva tensión – deformación. El punto de salida no es 0, sino un punto (elegido por convención, que corresponde a $\epsilon = 50\mu\text{m}$, que pretende corregir la leve concavidad de origen debida a los defectos iniciales del ensayo) y el punto final.

Normalmente, el módulo secante se considera que deriva de un defecto del ensayo de obtención del módulo de deformación, por eso en normativas como la EHE-08 no se tiene en cuenta y sólo se considera el módulo tangente.

Todos los hormigones presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal y elástico (en la descarga recuperan la geometría previa a la carga) ante la presencia incremental de sollicitaciones de compresión, cuando las cargas son comparativamente bajas (menores al 70% de la carga de rotura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la curva esfuerzo-deformación) cuando las cargas son altas (Neville, 1996), cuando finaliza el gráfico es señal de que el hormigón ha llegado a su límite de rotura. Así el módulo de elasticidad corresponderá al valor máximo que adquiere la tensión antes de deformarse plásticamente.

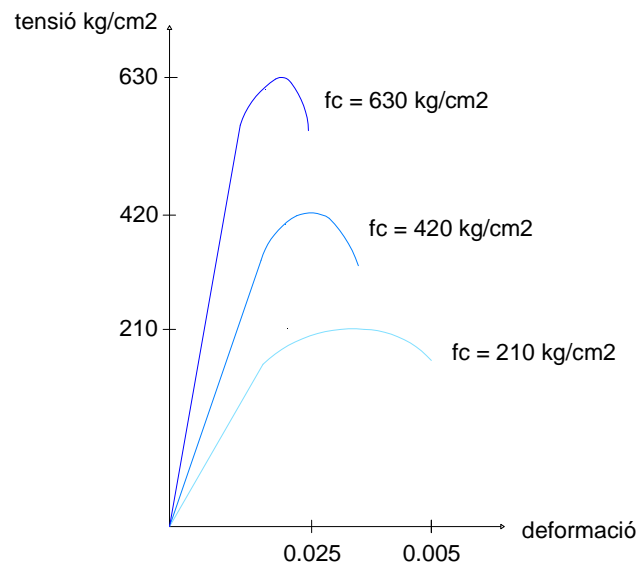


Figura 3. 1. Curva σ - ϵ según f_{ck}

El tipo de gráfico que se puede obtener depende, fundamentalmente de la resistencia a la rotura del hormigón, como se muestra en la Figura 3.1.:

El módulo de elasticidad se ve influenciado por cuatro parámetros (Kumar Mehta, 1986):

- *condiciones de ensayo*: se observa que en probetas ensayadas en condiciones húmedas muestran un 15% más de módulo de elasticidad que las mismas probetas ensayadas en condiciones secas
- *árido*: dejando de lado el módulo del árido grueso, la porosidad del árido parece el factor más importante, ya que ésta determina la rigidez del árido, y áridos densos proporcionan mayores módulos elásticos que áridos ligeros

- *zona de transición*: se ha determinado que la tensión y el módulo elástico están influenciadas en diferente nivel en función de la edad en que se encuentren. El módulo elástico aumenta en mayor proporción que la tensión entre los 3 y 12 meses
- *matriz del mortero*: el módulo elástico del mortero viene determinado por su porosidad, y ésta a su vez se controla por factores como la relación a/c, el aire ocluido y contenido en adiciones entre otros.

De los ensayos realizados por Urreta (1986), no se observa una disminución del módulo elástico con el aumento del contenido en finos, así pues se deduce que el aumento del contenido en finos (un aumento en el año 1986 suponía pasar del 5% de contenido de finos) no conlleva un aumento de la deformabilidad instantánea.

2.4 DEFORMACIONES DIFERIDAS

Des de el momento de su fabricación al estado endurecido el hormigón sufre cambios de volumen. Estos cambios de volumen se deben a diferentes fenómenos físico-químicos (retracción) como mecánicos consecuencia de las deformaciones que ocurren bajo carga permanente (fluencia) (Parapinski dos Santos, 2010).

La retracción y la fluencia son dos fenómenos que van relacionados a causa de las similitudes entre los dos tipos de deformación. Los dos fenómenos ocurren en la pasta y el árido ayuda a retener-los (Metha, et al., 2008) (Acker, 2001), si bien el origen y los mecanismos que causan la retracción y fluencia no son completamente comprendidos.

2.4.1 Retracción

Por retracción del hormigón se entiende la disminución de su volumen causada por las reacciones del agua bien sea con los otros componentes del hormigón o con el medio ambiente (Colomer, 1974). Se considera que existen dos tipos de retracción (Colomer, 1974):

- la *retracción endógena*, que es consecuencia de la pérdida de agua de los capilares para la hidratación del cemento, si el agua de los capilares no es compensada por una nueva entrada de agua se producirá una disminución del volumen, aunque esta será pequeña ya que el cambio volumétrico está restringido por la pasta ya rígida y por el árido
- la *retracción por secado*, que es la que produce la salida de agua del hormigón cuando éste se encuentra en una atmosfera no saturada. Una parte de esta variación de volumen es irreversible y no se produce simultáneamente en todo el hormigón, sino que depende del grosor de éste.

Es importante el estudio de la retracción por las consecuencias posteriores de ésta como lo es la fisuración. Si a la retracción de un elemento se le opone un obstáculo se originan unas fuerzas que dan lugar a las posteriores tensiones de

tracción, si estas superan la tensión de tracción del hormigón se pueden producir grietas (Colomer, 1974).

Los áridos presentan porosidades y contenidos de humedad variables que influyen en la regulación del proceso de retracción hidráulica, además existen otros efectos menos evidentes como la composición mineralógica de los áridos (Delibes, 1987).

La retracción fue estudiada por Bertrandy(1987), pero hasta contenido en finos del 8%, y afirma que el culpable del aumento de la retracción es principalmente la polución arcillosa.

La EHE-08 tiene en cuenta en su artículo 39.7 la influencia de la retracción, y cita como variables más importante para el cálculo de esta: el grado de humedad ambiente, el espesor o menor dimensión de la pieza, la composición del hormigón y el tiempo transcurrido desde la ejecución. Además en los comentarios del mismo artículo de la instrucción se da una fórmula para el cálculo del coeficiente de retracción que incluye todos estos factores.

2.4.2 Fluencia

La fluencia en el hormigón, es el aumento de deformación bajo carga constante. Es importante su consideración en el análisis estructural porque las deformaciones diferidas pueden alcanzar valores varias veces mayores que aquellos correspondientes a la deformación instantánea originada por la aplicación de la carga. Si las restricciones son tales que el hormigón sometido a carga sufre deformaciones constantes, la fluencia se manifiesta como disminución progresiva del esfuerzo en el tiempo, fenómeno que se conoce como relajación (Urtubey, y otros, 2006).

La fluencia depende de factores como:

- *el movimiento de agua absorbida o intercrystalina* que podemos encontrar en el hormigón y que se mueve bajo el esfuerzo de compresión (Urtubey, y otros, 2006)
- *los áridos*, el mortero favorece la fluencia mientras que los áridos gruesos actúan de restricción (Neville, 1996).
- *el esfuerzo aplicado*, la fluencia es directamente proporcional con el esfuerzo aplicado (Neville, 1996)
- *la resistencia del hormigón*: la fluencia es inversamente proporcional a la resistencia del hormigón al aplicar la carga (Urtubey, y otros, 2006)
- *la humedad relativa*, al secar el hormigón sujeto a una carga, se induce una fluencia adicional por secado. Si la probeta alcanza un equilibrio hídrico con el entorno antes de la aplicación de la carga, la influencia de la humedad relativa es menor o no existe, de modo que el factor que afecta a la fluencia no es la humedad relativa, sino el proceso de secado o fluencia por secado (Urtubey, y otros, 2006)

La fluencia se descompone en dos partes: *elástica instantánea* y *diferida* en el tiempo. La primera disminuye a medida que la edad del hormigón en el momento de la carga aumenta como resultado del incremento del módulo de elasticidad con la edad. Calcularemos la fluencia restando de la deformación total, que se mide en la probeta cargada, la suma de la deformación inicial instantánea debida a la tensión sostenida, la retracción y la eventual deformación térmica (Urtubey, y otros, 2006). Aunque la deformación instantánea también incluye un componente diferido durante la aplicación de la carga, lo usual es designar la deformación durante la aplicación de la carga como elástica y las adicionales como fluencia.

El contenido de agua o la humedad tienen un papel fundamental en el comportamiento diferido del hormigón (Acker, et al., 2001). Al realizar ensayos sin intercambio de humedad (fluencia básica), cuanto menos es el contenido de agua evaporable en la muestra menor es la fluencia, incluso puede llegar a ser despreciable (Tamtsia, et al., 2000). Por el contrario si los ensayos se realizan considerando el secado de la pieza, mientras mayor es el secado mayor es la fluencia sufrida. Ello está relacionado con la propiedad de incompresibilidad del agua.

La EHE-08 tiene en cuenta en su artículo 39.8 la influencia de la fluencia, y cita como variables más importante para el cálculo de esta: el grado de humedad relativa, la edad de la carga y el tipo de cemento y la temperatura de curado. Además en los comentarios del mismo artículo de la instrucción se da una fórmula para el cálculo del coeficiente de retracción que incluye todos estos factores.

2.5 TRATAMIENTO NORMATIVO

La principal causa de la limitación en el contenido de finos viene dado porque las partículas de fino se agrupan formando una delgada capa sobre la superficie de los áridos más grandes, disminuyendo así su adherencia. Y como ya se ha comentado en este mismo capítulo, la adherencia entre el árido y el mortero es uno de los factores más influyentes en su resistencia.

Para que realmente sea perjudicial para la adherencia del árido, las partículas tienen que encontrarse en gran cantidad y ser muy finas de manera que exista una película impenetrable por el conglomerante durante la hidratación con el árido mayor (González Martínez, 1992).

Las limitaciones impuestas al contenido de finos han sido matizadas con otros ensayos específicos sobre los finos para determinar el contenido de arcilla (azul de metileno) o su influencia (equivalente de arena) (González Martínez, 1992).

2.5.1 Evolución

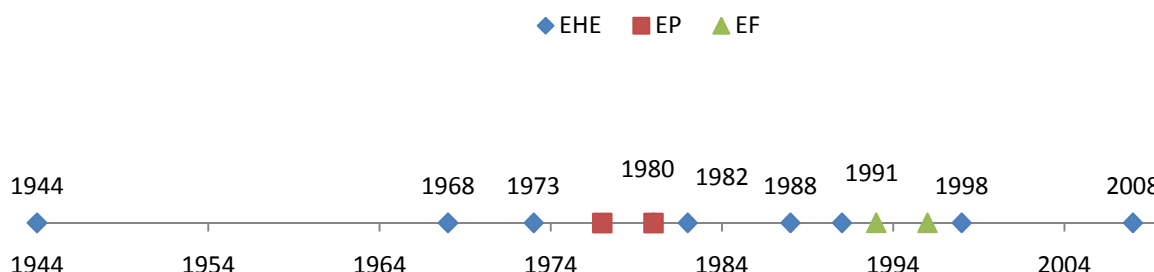
La Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE), es el nombre que recibe la normativa española sobre el cálculo y seguridad en estructuras de hormigón, y donde se intenta recoger las tendencias de análisis estructural, estados límite, durabilidad, ejecución y control (www.wikipedia.com)

El redactado de una normativa en relación al hormigón, surge de la necesidad de garantizar la seguridad de las personas y los bienes afectados por las obras de hormigón, y de establecer prescripciones, con objeto de asegurar su funcionalidad. En 1939 se aprueba la primera Instrucción de Hormigón, como reglamento técnico provisional, pero de obligado cumplimiento. Ésta primera Instrucción de 1939 fue modificada y ampliada para acabar siendo aprobada oficialmente en 1944.

A ésta instrucción le siguió un conjunto de recomendaciones del Instituto Torroja de carácter no oficial en 1968, que sirvió de base para la instrucción oficial EH-PRE-72 en referencia al hormigón preparado. Cerrando así una etapa en que los objetivos de resistencia mecánica y estabilidad, aspectos funcionales inherentes a este tipo de obras, presidieron la elaboración de la normativa (Martín, 2003). La siguiente Instrucción es de 1973 y según Martín, marca un hito en la reglamentación técnica específica sobre la materia. El objetivo era conseguir mayores cotes de calidad en cada nueva Instrucción, así en la EH-73 se incluye un apartado en relación al control de calidad del proyecto, los materiales y la ejecución.

Posteriormente surgen la EH-80, EH-82, EH-88 y EH-91, EHE-98 y la actual EHE-08 sobre hormigón en masa y armado y en paralelo las EP-77, EP-80 y EP-93 para el hormigón pretensado y las EF-88 y EF-96 para los forjados unidireccionales de hormigón armado y pretensado.

Evolución temporal de la Normativa Española



Pero no es hasta la EH-88 que se hace una restricción estricta en referencia al uso de los finos en los áridos. Si bien la EH-80 en su artículo 7º sobre áridos, admite que puedan emplearse arenas y gravas de rocas machacadas:

“cuyo empleo se encuentre sancionado por la práctica o resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en el Laboratorio. Cuando no se tengan antecedentes o en caso de duda, deberá comprobarse que cumplen las condiciones 7.3”.

En el artículo 7.3 se limitan los terrones de arcilla, según UNE 7.133, pero sin hacer referencia a la arcilla en polvo que puedan llevar los finos. Finalmente se limitan los finos que pasan por el tamiz 0.080 UNE 7.050 al 5% en peso para el árido fino.

En la misma norma en el artículo 63.3 referente a Control de Áridos para el hormigón, especifica que:

“el no cumplimiento del artículo 7.3 es condición suficiente para calificar el árido como no apto para fabricar hormigón”.

El motivo por el que se decidió cambiar la normativa residen en los estudios llevados a cabo por (Oroviogicoechea, 1981), donde se hace observación en que en zonas donde las arenas se obtienen por machaqueo de piedra caliza sucede que el % de finos siempre es superior al 5% especificado en la EH-80 aunque la piedra machacada se encuentre completamente limpia.

Esto se suma a la realidad que en la época (1981) los contenidos de finos en las arenas que utilizaban las hormigoneras eran superiores al 5% marcado (eran usuales valores entre el 10 - 17%) pero cumplían con las resistencias mínimas requeridas.

Estudios realizados para poder modificar la norma, resaltaron que en hormigones de baja resistencia el problema no era el sobrepasar el contenido de finos en las muestras, sino que otros factores que también sobrepasaban el límite marcado por la Instrucción también influían. En muchos de estos casos había una coincidencia y era el contenido de materiales arcillosos en los finos de la arena.

De aquí que surja la necesidad de modificar la norma EH-80 en materia de finos, limitando su uso por el contenido de arcilla y siendo más tolerante en el % de finos menores de 0,08 si estos no son arcillosos, por eso se propone una condición que englobe ambos conceptos, cantidad de finos y contenido en arcilla en ellos (Oroviogicoechea, 1981).

En consecuencia se desarrolla una campaña de ensayos sobre morteros utilizando los ensayos normalizados de cementos para hacer los ensayos más representativos.

El resultado de la campaña es la propuesta de nuevos límites:

- tomar como referencia la resistencia que se obtiene para el 5% de finos contemplado en las normas
- uso del Equivalente de Arena (EA) como referencia
- para ligar el porcentaje total de finos (F) y el EA se propone la siguiente fórmula $F + EA \geq EA_5$, es decir que la suma de finos en % y el EA en % también tenía que ser igual o mayor que el EA con 5% de finos que se tomó como patrón.

A partir de estos datos se modifica la EH-88 y se amplían los límites para los finos con los pertinentes ensayos como se puede observar en la Tabla 2.1, la Tabla 2.2 y la Tabla 2.3.

Años después, en 1986, y también con ánimo de ampliar los límites marcados por la Instrucción, estudios realizados por Urreta (1986) destacan que en ausencia de arcilla la resistencia a la compresión no se ve perjudicada por el aumento de finos, incluso para valores superiores al 15%. Cuando se habla de beneficiar o perjudicar, tomamos como referencia los resultados obtenidos para arenas con la misma

proporción de arcilla y finos dentro de las normas. Así otros autores como Betrandy (1987) jugando con porcentajes de arcilla del 1 al 2 % observan para dosificaciones altas (325 kg/m^3) un pequeño descenso de resistencia, en torno al 10%, cuando el contenido de finos pasa del 5% a valores entre el 10 y el 15 %, aunque con dosificaciones bajas (250 kg/m^3) el descenso es menor, alrededor del 5%.

Como se observa en la Tabla 2.1. existe una pérdida importante de resistencia al aumentar el contenido de arcilla, comparado con masas completamente limpias y con contenidos de finos entre el 10 y el 15%. Se deduce que el incremento de arcilla hace caer en escalón las resistencias obtenidas.

Arcilla en la arena (%)	Pérdida de resistencia (%)
1	11
2	15
3	19
4	23

Tabla 2. 1. Pérdida de resistencia en función del porcentaje de contenido de arcilla. (Urreta, 1986)

El control de la limpieza de las arenas, en la EHE-08, se ejerce por medio del contenido en finos, el equivalente de arena y el azul de metileno.

Como ya se ha comentado, uno de los ensayos que caracteriza el contenido de arcilla en las arenas es el Equivalente de Arena (E.A.) (UNE-EN 933-8:2000). El objetivo del ensayo es determinar la fracción granulométrica 0/2mm o 0/4mm de los áridos finos y de la mezcla total de los áridos (el mismo ensayo recibe el nombre SE_4 cuando se limita la humedad máxima portante del árido al 8%).

El ensayo, se fundamenta en liberar de la muestra de ensayo los posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena mediante la adición de una solución coagulante que favorece la suspensión de las partículas finas sobre la arena, determinando su contenido respecto de las partículas de mayor tamaño. Así pues, con este ensayo podemos determinar la proporción de arcilla y el contenido de finos que existe en una muestra de arena.

El problema de este índice es que podría permitir aceptar arenas con moderados contenidos de finos y altas proporciones de arcilla, combinaciones que conducen a bajos resultados (Urreta, 1986). Los ensayos de Urreta (1986) para valores del Equivalente de Arena a Vista (E.A.V) de 60-65, muestran valores muy permisivos con las arenas de bajo contenido en finos totales y alto en arcilla. Elevando el coeficiente a 75, se puede llegar a eliminar arenas de elevado contenido en finos pero sin arcilla, muestras que dan buena resistencia, y permiten elevar el contenido de finos (Urreta, 1986).

La evolución de los límites (valor mínimo) sobre el ensayo del Equivalente de Arena, han cambiado con el tiempo, como se puede apreciar en la Tabla 2.2. Cabe

destacar también que hasta la EHE-98 se utilizaba el ensayo del Equivalente de Arena a Vista (E.A.V), y en la última Instrucción, EHE-08, se utiliza el SE_4 .

EAV	en (1)	resto de los casos
EHE-08	70	75
EHE-98	75	80
EH-91	75	80
	en (2)	en (3)
EH-88	75	80

- (1) para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición
 (2) para obras en ambiente I y II
 (3) para obras en ambiente III o que hayan de soportar ciclos de hielo/deshielo

Tabla 2. 2. Valores del ensayo del EA en las diferentes instrucciones

Como información adicional, una pequeña aclaración sobre cada tipo de ambiente según la Instrucción española (EHE-08):

- Tipo I: Interiores de edificios no sometidos a condensaciones. Hormigón en masa.
- Tipo IIa: humedad alta. Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%), o a condensaciones. Exteriores en ausencia de cloruros y expuestos a la lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. Elementos enterrados o sumergido
- Tipo IIb: humedad media. Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm.
- Tipo IIIa: clase marina. Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km).
- Tipo IIIb: clase marina. Elementos de estructuras marinas, sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar
- Tipo IIIc: clase marina. Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas.
- Tipo IV: obras con cloruros de origen diferente a los marinos. Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.

Para mitigar el efecto negativo del SE_4 en la normativa se combina con el ensayo del Azul de Metileno (AM) (UNE-EN 933-9:1999). El objeto del ensayo es determinar el valor de azul de metileno de la fracción granulométrico 0/2 mm de los áridos finos o de la mezcla total de los áridos. Se fundamenta en la adición de

pequeñas dosis de disolución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua, comprobando la absorción de colorante por parte de la muestra y realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro.

Los ensayos realizados por Urreta (1986) muestran que es un ensayo con poca dispersión y sensible al incremento de arcilla. Al incrementar los finos en cada nivel de arcilla, el azul de metileno requerido aumenta de una forma lineal. Combinando los resultados del AM con los de resistencia se aprecia que un incremento de arcilla supone un decremento de resistencia y un incremento de azul. Por otra parte, dentro de un mismo nivel de arcilla (a excepción de arenas de $i = 0\%$), un incremento de finos totales implica una disminución limitada de la resistencia y un aumento de azul de metileno (Urreta, 1986).

Al igual que pasa con el ensayo del Equivalente de Arena, los valores del ensayo del Azul de Metileno han cambiado como se observa en la tabla 2.3

AM	en (1)	resto de casos
EHE-08	$AM \leq 0,6 \cdot \frac{f}{100}$	$AM \leq 0,3 \cdot \frac{f}{100}$
EH-98	$AM \leq 0,6 \cdot \frac{f_i}{100}$	$AM \leq 0,3 \cdot \frac{f_i}{100}$
	en (2)	en (3)
EH-91	$AM \leq 0,6 \cdot \frac{f_i}{100}$	$AM \leq 0,3 \cdot \frac{f_i}{100}$
EH-88	$AM \leq 0,6 \cdot \frac{f_i}{100}$	$AM \leq 0,3 \cdot \frac{f_i}{100}$

(1) obras sometidas a clases generales de exposición I, IIa ó IIb, que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición

(2) para obras en ambientes I y II

(3) para obras en ambiente III o que hayan de soportar ciclos de hielo-deshielo

AM :Valor del azul de Metileno en gramos de azul por cada kg de fracción granulométrica 0/2 mm

f: el contenido de finos de la fracción 0/2, expresado en g/kg

fi: contenido de finos expresado en g/kg

Tabla 2. 3. Valores del ensayo de AM para las diferentes instrucciones

En relación al contenido máximo de finos en las diferentes normativas, se muestran los datos sobre las normativas encontradas. Así se dispone de datos des de la EH-88 sobre el contenido máximo de finos en porcentaje del peso de la muestra de árido grueso total o de árido fino total:

	árido grueso			árido fino	
	redondeados	machaqueo calizos	redondeados o (1)	(2) o (3)	(4)
EHE-08	1,5	1,5	6	10	16
EHE-98	1	2	6	10	15
	redondeados	machaqueo calizos	carácter general	(6)	(5)
EH-91	1	2	6	10	15
EH-88	1	2	6	10	15

- (1) áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIB, IIIC, IV o bien a alguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E, H y F
- (2) de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIB, IIIC, IV o bien a alguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E y F
- (3) áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E, H y F
- (4) áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E, H y F
- (5) arenas procedentes de rocas calizas para obras en ambientes I y II
- (6) arenas procedentes de rocas calizas para obras en ambiente III o que hayan de soportar ciclos de hielo-deshielo

Tabla 2. 4. Contenido máximo de fino de las diferentes instrucciones

Como ya se comentó antes, una información adicional sobre las clases específicas de exposición según la instrucción española EHE-08:

“Además de las clases y subclases generales de exposición, los elementos estructurales pueden estar expuestos a otras clases específicas de exposición, relacionadas con procesos de deterioro del hormigón distintos al de la corrosión de las armaduras: agresión química débil (Qa), media (Qb), y fuerte (Qc); heladas sin sales fundentes (H), y con sales fundentes (F); y erosión (E). La clasificación y designación de este tipo de exposiciones se desarrolla con detalle en el punto 8.2.3 de la Instrucción.”

2.5.2 Actual

El Consejo de Ministros aprobó la EHE-08 el 18 de Julio de 2008, fue publicada en el BOE con fecha 22 de agosto de 2008, quedando derogadas las anteriores

El artículo 28º de la EHE-08 hace referencia al uso de los áridos para las mezclas de hormigón. Los áridos que se utilicen han de permitir alcanzar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón, así como cualquier otra exigencia que se requiera en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto.

Si bien el artículo es muy extenso, nos centraremos en los apartados que parezcan más convenientes dado el tema que estamos tratando.

Se limita el uso de áridos a áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas) según la UNE-EN 12620, rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire, y en general cualquier tipo de árido cuya

evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.

Los áridos no deben ser reactivos con el cemento, ni deben descomponerse por los agentes exteriores a que estarán sometidos en obra. Se establecen requisitos generales de los tamaños máximo y mínimo, series de tamices para especificar los tamaños de los áridos, así como limitaciones del árido grueso para la fabricación del hormigón

El artículo 28.4 hace referencia a la granulometría de los áridos, determinada según la norma UNE-EN 933-1:2000.

La cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 UNE-EN 933-1:2000, expresada en porcentaje del peso de la muestra de árido grueso total o de árido fino total, no excederá los valores de la Tabla 2.5 (que se corresponde con la tabla 28.4.1.a. de la EHE-08). En caso contrario, deberá comprobarse que se cumple la especificación relativa a la limitación del contenido total de finos en el hormigón recogido en el artículo 31.1. de la EHE-08.

Árido	%*	TIPOS DE ÁRIDOS
Grueso	1,5%	Cualquiera
Fino	6%	Áridos redondeados Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien a alguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E, H y F (1)
	10%	Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien a alguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E y F (1) Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E, H y F(1)
	16%	Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna de las clases específicas de exposición Qa, Qb, Qc, E, H y F (1)

(1) Véanse las tablas 8.2.2 y 8.2.3.a de la EHE-08

Tabla 2. 5. Contenido máximo de finos en los áridos

En los comentarios de la EHE-08, se recomienda que la curva granulométrica del árido fino total esté comprendida dentro del huso definido en la Tabla 2.6 (que se corresponde con la tabla 28.4.1.b de la EHE-08). En el caso de arenas que no cumplan con las limitaciones establecidas en el referido huso, especialmente las recogidas para el material de tamaño inferior a 0,063mm, se recomienda que su empleo esté condicionado a que se cumpla lo indicado en el artículo de la EHE-08 31.1 y exista un estudio experimental específico que justifique que las propiedades relevantes de los hormigones con ellos fabricados son, al menos, iguales que las de los hormigones hechos con los mismos componentes, pero sustituyendo la arena por una que cumpla el huso.

Límites (mm)	Material retenido acumulado, en % en peso, en los tamices						
	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Superior	0	4	16	40	70	77	*
Inferior	15	38	60	82	94	100	100

*hace referencia al % de áridos en función de su origen y exposición según la Tabla 2.5

Tabla 2. 6. Huso granulométrico del árido fino

El valor de la tabla anterior (*), será el que corresponda de acuerdo con la Tabla 2.5:

- 94% para: áridos redondeados o áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a la clase general de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien que estén sometidas a alguna clase específica de exposición
- 90% para: áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición
- 84% para: áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición

En referencia al artículo 31.1 de la EHE-08 sobre la composición de los hormigones, se destaca que:

La cantidad de finos en el hormigón, resultante de sumar el contenido de partículas del árido grueso y del árido fino que pasa por el tamiza UNE 0,063 y la componente caliza, en su caso, del cemento, deberá ser inferior al 175 kg/m³. En el caso de emplearse agua reciclada, de acuerdo con el Artículo 27º, dicho límite podrá incrementarse hasta 185 kg/m³.

El párrafo anterior es uno de los puntos de partida de la presente tesina. Como se ha comentado en el Capítulo 1, la instrucción actual permite un contenido de hasta 250 kg/m³ en HAC. Por esta razón y lo visto a lo largo de este capítulo se cuestiona porque en hormigones convencionales el límite llega sólo a 175 kg/m³ o 185 kg/m³ con el uso de aguas recicladas.

En referencia a la calidad de los áridos, el artículo 28.4.2 sobre “Calidad de los finos de los áridos”:

Salvo en caso indicado en el párrafo siguiente, no se utilizarán áridos finos cuyo equivalente de arena (SE₄), determinado sobre la fracción 0/4, de conformidad con el Anexo A de la norma UNE-EN 933-8:2000 sea inferior a:

- 70, para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición. Véanse las Tablas 8.2.2 y 8.2.3.a.
- 75, el resto de los casos.

No obstante lo anterior, aquellas arenas procedentes del machaqueo de rocas calizas o dolomías (entendiendo como tales aquellas rocas sedimentarias carbonáticas que contienen al menos un 70% de calcita, dolomita o de ambas que no cumplan las especificación del equivalente de arena, podrán ser aceptadas como válidas cuando se cumplan las condiciones siguientes:

- Para obras sometidas a clases generales de exposición I, IIa ó IIb, que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición

$$AM \leq 0,6 \cdot \frac{f}{100} \quad [2.3]$$

Donde AM es el valor de azul de metileno, según UNE-EN 933-9, expresado en gramos de azul por cada kilogramo de fracción granulométrica 0/2 mm y f es el contenido de finos de la fracción 0/2, expresado en g/kg y determinado de acuerdo con UNE-EN 933-1:2000

- Para los casos restantes

$$AM \leq 0,3 \cdot \frac{f}{100} \quad [2.2]$$

También se limita la forma del árido grueso, así como se exigen requisitos físico-mecánicos y químicos.

Así como la EHE-08 manda dentro del estado Español, existe un compromiso para que el Eurocódigo 2 sea la normativa de referencia en nuestro país. De hecho ya se han hecho movimiento para adaptarse al código europeo.

Los Eurocódigos estructurales, son un conjunto de normas europeas para la ingeniería de carácter voluntario, redactadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), que pretende unificar criterios y normativas en las materias de diseño, cálculo y dimensionado de estructuras y elementos prefabricados para edificación. En concreto el Eurocódigo 2, trata sobre las estructuras de hormigón.

2.6 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se han visto las propiedades del hormigón en fresco como en su estado endurecido y como afecta el contenido de finos a éstas propiedades:

- en relación al hormigón fresco, se ha observado que los finos favorecen la compacidad y la manejabilidad al reducir el nivel de huecos a la vez que una falta de finos produce exudación, pero también hay que tener en cuenta que un aumento del contenido en finos produce segregación, aumenta al superficie

específica y por tanto el hormigón requiere más agua obtener una misma consistencia

- en relación al hormigón endurecido los finos forman una capa delgada sobre la superficie de los áridos que reduce la adherencia entre mortero y árido grueso. Uno de los factores más influyentes en el hormigón endurecido es la resistencia a compresión, ésta depende principalmente de la relación a/c, la compactación, la cantidad de cemento y de la granulometría de los áridos, estando todos los factores relacionados directa o indirectamente con el contenido de finos de una mezcla. La resistencia a tracción es menos sensible que la resistencia a compresión en relación a los finos y el modulo elástico no se ve influido negativamente por un aumento de finos en el hormigón.
- en relación a las deformaciones diferidas y su relación con el contenido de finos, es un campo que todavía queda por estudiar, si bien se cree que uno de los culpables del aumento de la retracción en las mezclas de hormigón es la polución arcillosa de los finos.
- en relación a la normativa y el contenido de finos ha evolucionado hacia una restricción del contenido de arcilla en éstos con ensayos como el azul de metileno y el equivalente de arena.

CAPÍTULO 3:

PROGRAMA DE TRABAJO

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha revisado la aportación de los finos a un hormigón convencional en las diferentes edades. El aumento de finos produce en general efectos beneficiosos sobre el hormigón como lo son las mejoras en la compacidad y la manejabilidad aunque hay otros factores negativos como la reducción de la resistencia a compresión por el aumento de agua que plantean el estudio de la aportación de estos a las mezclas de hormigón. La EHE-08 actual limita su contenido a 175 kg/m^3 o 185 kg/m^3 en el caso de aguas recicladas. Pero en el caso de HAC el contenido de finos aumenta hasta 250 kg/m^3 .

Como consecuencia se plantea la posibilidad de que un hormigón convencional tenga un contenido de finos superior al marcado por EHE-08 en HAC. Por eso en las campañas realizadas se fija el contenido de finos en 275 kg/m^3 como muestra estudio y 175 kg/m^3 como muestra patrón.

En el presente capítulo se describen los aspectos considerados en la realización de la campaña experimental diseñada para la caracterización de los hormigones con el aumento de finos señalado de 275 kg/m^3 . Se definen las bases de la campaña experimental llevada a cabo en el LTE y los ensayos que se llevaron a

cabo para la caracterización mecánica del hormigón utilizado. Así como también se detalla la campaña previa realizada en PROMSA y los resultados de éstos.

3.2 DEFINICIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La campaña experimental que se desarrolla en relación a esta tesina pretende conseguir unos resultados válidos y significativos al comportamiento de los hormigones habituales usados en edificación con un contenido en adición caliza mayor que el permitido en la actual norma EHE-08.

De la misma manera que en las campañas experimentales vistas en el capítulo anterior se definen unos parámetros a analizar para poder observar y analizar el comportamiento del hormigón en las condiciones citadas.

Las dosificaciones utilizadas en los ensayos realizados en el LTE, son dos, y se basaron en unos estudios previos en los laboratorios de PROMSA. Las dos dosificaciones tienen diferentes contenidos de finos de origen calizo, una dentro de la norma actual EHE-08 (175 kg/m^3) y otra muy por encima de esta (275 kg/m^3) pero con el resto de componentes (áridos, cemento y aditivos) iguales.

3.2.1 Ensayos sobre el hormigón

A cada dosificación se le realizaron diferentes ensayos. En los ensayos realizados por PROMSA el objetivo era determinar si las dosificaciones utilizadas eran válidas para cumplir los requerimientos marcados por la Instrucción EHE-08 y sentar unas bases para definir la dosificación final en los ensayos realizados en el LTE.

Campaña	PROMSA	LTE
Fecha realización	Junio 2009	Febrero 2010
Objetivo	determinar dosificación final	caracterización hormigones con 275 kg/m^3 de finos

Tabla 3. 1. Resumen campañas realizadas

Las pruebas realizadas por PROMSA fueron las siguientes:

- Ensayo de asentamiento
- Densidad del hormigón fresco y aire ocluido
- Penetración de agua
- Ensayo de tracción indirecta (Ensayo Brasileño)
- Resistencia a compresión a 7 y 28 días

El objetivo de los ensayos realizados en el LTE era poder caracterizar el hormigón con alto contenido en finos comparándolo con una muestra patrón.

- Determinación de la resistencia a compresión de probetas
- Determinación del módulo de elasticidad en compresión
- Resistencia a tracción indirecta de probetas
- Determinación de la retracción y la fluencia

Ensayo de asentamiento

La EHE-08 en el artículo 31.5 establece que la docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento (cono de Abrams), según UNE-EN 12350-2-2006.

Densidad del hormigón fresco y aire ocluido

Para la determinación de la densidad y el aire ocluido del hormigón endurecido, se ensayaron 3 probetas cilíndricas de cada dosificación siguiendo las especificaciones de la norma UNE 83-312-90. En cada determinación se pesa la muestra para determinar su masa y a partir de los datos obtenidos (masa de la muestra saturada con superficie seca (m_1), masa de la muestra secada en estufa (m_2), masa hidrostática (m_3) y siendo ρ_w la densidad del agua) determinan las siguientes densidades:

$$\text{densidad de la muestra saturada} \quad \rho_1 = \left(\frac{m_1}{m_1 - m_2} \right) \cdot \rho_w \quad [3.1]$$

$$\text{densidad de la muestra secada en estufa} \quad \rho_2 = \left(\frac{m_2}{m_1 - m_2} \right) \cdot \rho_w \quad [3.2]$$

$$\text{densidad de la muestra aparente} \quad \rho_3 = \left(\frac{m_2}{m_1 - m_3} \right) \cdot \rho_w \quad [3.3]$$

Penetración de agua

Antes de iniciar el ensayo se somete a las probetas a un período de secado previo de 72 horas en una estufa de tiro forzado a una temperatura de 50 ± 5 °C. Con objeto de suprimir la capa superficial del hormigón se debe tratar la zona de ensayo mediante un procedimiento adecuado, por ejemplo, un cepillado con púas metálicas al finalizar el fraguado o un repicado en caso de hormigones endurecidos.

Durante al menos 48 horas antes de la realización del ensayo, se procedió a un secado en estufa a 50°C, para eliminar la humedad evitando la aparición de fisuras que podrían provocar un falso resultado de los resultados si el secado fuese a mayor temperatura.

Una vez las probetas se enfrían a 20°C y se impermeabilizan los laterales de las mismas para evitar el contacto de éstos con el agua, posteriormente se introducen en los moldes cilíndricos para la realización del ensayo.

Se aplica a cada probeta una presión de agua de 500 ± 50 KPa durante 72 horas por la base cortada. Si durante este proceso existen fugas, el ensayo debe pararse y no será posible su análisis. Tras el periodo de aplicación de la presión, se saca la probeta del dispositivo de ensayo, se limpia el exceso de agua de la cara

sometida a presión y se rompe la probeta en dos mitades, perpendicularmente a dicha cara, siguiendo el procedimiento establecido para determinar la resistencia indirecta del hormigón según el método brasileño (UNE 83-306-85).

Inmediatamente después de romper la probeta, se marca con un rotulador el frente de la penetración de agua, se mide la profundidad máxima de penetración y se calcula la profundidad media. Todas estas operaciones se realizan apoyando la probeta sobre la cara expuesta al agua.

La Figura 3. 2 a) y b) nos muestran parte del material usado para el ensayo de penetración de agua. En a) podemos ver las probetas cortadas por la mitad en los moldes listas para ser ensayadas, y en b) podemos ver el aspecto del material durante el ensayo.



Figura 3. 2. Ensayo de Penetración de agua. a) probetas en los moldes para el ensayo, b) ensayo

La EHE-08 en el artículo 86.3.3 establece que la comprobación de la profundidad de penetración de agua bajo presión en el hormigón, se ensayará según UNE-EN 12390-8-2001. Los valores máximos permitidos por la EHE-08 son 3 cm de penetración media y hasta 5 cm de penetración máxima.

Resistencia a Compresión

La resistencia a compresión se ha evaluado a dos edades 7 y 28 días, ensayándose un mínimo de 2 probetas para cada edad y dosificación, de acuerdo con la norma UNE-EN-12390-3. Antes de proceder al ensayo se procedió a refrentar las probetas según la norma UNE 83-303-84.

El objetivo de refrentar las probetas es cubrir las irregularidades de la probeta, de manera que para el ensayo nos encontremos con una superficie plana y

perpendicular a su arista, para que en su rotura, las presiones se repartan uniformemente en toda la superficie superior y sea paralela con la inferior. El método usado en el LTE para refrentar las probetas es el mortero con azufre mientras que en PROMSA es mediante pulido.

La máquina dispone de dos platos de acero con caras planas y de superficie superior en un mínimo de un 3% a la probeta a ensayar. El espesor de los platos debe asegurar la indeformabilidad de los mismos durante el ensayo.

Tras colocar la probeta, se aplica la carga de forma continua y sin saltos bruscos de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta sea de $0,5 \pm 2$ MPa/s. La velocidad de carga debe ser constante hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura. Se toma como carga de rotura máxima alcanzada y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

La resistencia característica a la compresión de un hormigón f_{ck} se utiliza en el diseño estructural, se mide en términos probabilísticos, definiéndose que solamente un pequeño porcentaje de las muestras (5%) pueden tener resistencias inferiores a la especificada, lo que da lugar a que la resistencia media de las muestras f_{cm} siempre sea mayor que la resistencia característica.

La EHE-08 asume una distribución normalizada (campana de Gauss) de los ensayos de rotura de cilindros de hormigón, la resistencia característica puede calcularse a partir de la resistencia media y la desviación típica (σ) mediante la expresión

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \sigma \quad [3.4]$$

En los comentarios del artículo 39.6 de la EH-08 encontramos la fórmula para el cálculo de la resistencia media a compresión (que atribuye una desviación típica de 4,9%).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad [3.5]$$

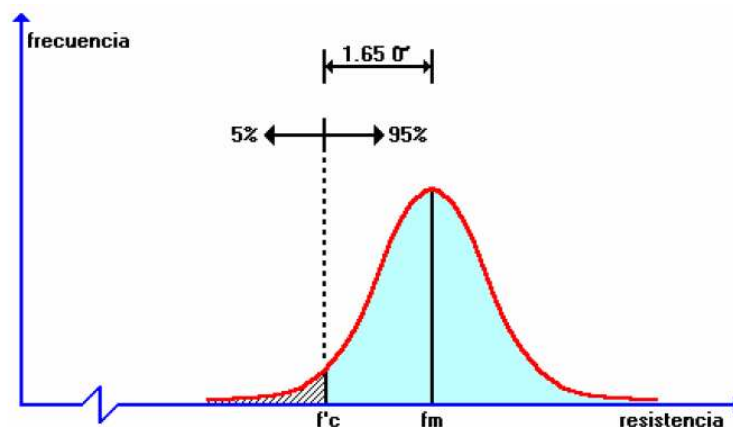


Figura 3. 3. Distribución Normal, Campana de Gauss

En nuestro caso dado que la resistencia característica $f_{ck} = 25$ MPa tendremos que el valor de la resistencia media $f_{cm} = 33$ MPa. Estos valores serán los que nos da el criterio para decir si un hormigón es válido o no según su resistencia a compresión.

Ensayo de tracción indirecta (Ensayo Brasileño)

La resistencia a tracción indirecta se evalúa a 28 días de edad, para cada tipo de dosificación habiéndose ensayado 3 probetas cilíndricas de 15x30cm de acuerdo con la norma UNE 83-306-85. Antes de proceder al ensayo se procedió a refrentar las probetas según la UNE 83-303-84 según el método explicado en el apartado anterior.

La probeta se coloca horizontalmente apoyada en el plato inferior de manera que las superficies planas queden perpendiculares al plato de carga. Con esta colocación se consigue que la carga se aplique únicamente sobre una generatriz. A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin aumentos bruscos de manera que la progresión de la tensión de tracción indirecta sea de $0,3 \pm 0,01$ MPa/s.

Para el cálculo de la tensión indirecta se empleó la siguiente expresión:

$$f_{tl} = \frac{2P}{\pi \cdot l \cdot d} \quad [3.6]$$

siendo: f_{tl} : tensión de tracción indirecta
 P : carga aplicada
 l : longitud de la probeta
 d : diámetro de la probeta

Es habitual estimar la resistencia a tracción en función de la obtenida en compresión (Delibes, 1987). En el artículo 39.1 de la EH-08 se define la resistencia media a tracción $f_{ct,m}$ según:

$$f_{ct,m} = 0,30 \sqrt{f_{ck}^2} \quad [3.7]$$

Así pues en nuestro caso $f_{ct,m} = 2,6$ MPa, que representa el 10,3 % de la resistencia característica o el 7,9% de la resistencia media a compresión.

Determinación del módulo de elasticidad en compresión

Se evaluó el módulo de elasticidad en compresión a 7, 28 y 90 días de edad, para cada dosificación se ensayaron 3 probetas cilíndricas de acuerdo con la norma UNE 83-316-1996.

El módulo elástico de compresión, E_c , es conocido como módulo secante, que en N/mm^2 , se calcula con la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad [3.8]$$

donde: $\Delta\epsilon$ y $\Delta\sigma$ son, respectivamente, los incrementos de tensión y deformación producidos entre las tensiones de $0,5 \text{ N/mm}^2$ y la correspondiente a $1/3$ de ruptura del hormigón en éste caso.

Se utiliza una máquina capaz de aplicar la carrera del ensayos a la velocidad especificada y de mantener-la en el escalón correspondiente. Además, se necesitan instrumentos para medir los cambios de longitud, teniendo una base de medida no menores de dos tercios del diámetro de la probeta de ensayo y que permita su colocación de tal forma que los puntos de medida sean equidistantes de las bases de la probeta y a una distancia no menor de un cuarto de la altura de la misma.

Previamente a éste ensayo, deberemos haber obtenido el valor de la resistencia a la rotura por compresión siguiendo las especificaciones de la UNE 83-304-84. Se aplicarán 3 ciclos de carga hasta una tercera parte del valor de la tensión de rotura por compresión obtenida. La tensión se incrementará uniformemente a una velocidad de $0,5 \pm \text{N/mm}^2$ hasta ese valor máximo, en el que se mantendrá durante 60 segundos y se registrará la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30s.

En el capítulo 39.6 de la EHE-08 encontramos una fórmula para el cálculo del módulo de deformación longitudinal secante E_{cm} a 28 días:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad [3.9]$$

Expresión válida siempre que las tensiones en condiciones de servicio, no sobrepasen el valor de $0,40f_{cm}$. En el caso que nos ocupa siendo $f_{cm} = 33 \text{ MPa}$, tendremos que $E_{cm} = 27,26 \text{ MPa}$ a 28 días.

Resistencia tracción indirecta

La determinación de la resistencia a tracción indirecta del hormigón se ha realizado según la norma UNE-EN 123690-6. Estas determinaciones se han hecho para cada dosificación a los 28 días utilizando 3 probetas.

Determinación de la retracción y la fluencia

Los ensayos de retracción se han realizado según la norma UNE 83-318-94, y los ensayos de fluencia, según las directrices dadas en la norma ASTM C512.

Para ambos ensayos se han utilizado probetas cilíndricas equipadas con 1 galga embebida y 3 bases extensiométricas de 15 cm, situadas en los meridianos equidistantes (a 120°) para las lecturas con el extensómetro mecánico. Se ha utilizado un equipo de medida electrónico.

Previamente al hormigonado de la probeta, la galga embebida se instala en la zona central del molde, sujeta con hilo nylon según la dirección de las generatrices. El cable de la galga sale por la cara superior de la probeta para garantizar su posicionamiento centrado con la ayuda de una tapa con agujero central, que se encaja en el molde en el momento de la finalización del hormigonado. La utilización de las galgas embebidas, permite las lecturas de las deformaciones desde el instante de su hormigonado.

El proceso de confección de las probetas para los ensayos de retracción y fluencia es el mismo que el explicado en el apartado 3.3.1 con la diferencia que una vez desmoldadas las probetas se sumergen en agua hasta los 33 días (el procedimiento estándar es introducir las probetas en la cc al cabo de 28 días, pero en éste caso y por problemas vacacionales se alargó el periodo de espera para el ensayo en las dos dosificaciones por igual) para su curado por inmersión. Pasado este tiempo se ponen en carga las probetas de fluencia a través de un bastidor situado dentro de la cámara climática como muestra la Figura 3.4. Dicho bastidor, consta de dos placas de acero de 6 cm de espesor unidas por cuatro tirantes roscados.

Sobre la placa inferior se asienta un disco de acero, y sobre él un gato con una rótula de 50 t de 19 cm de diámetro útil. Éste gato consta de dos orificios, uno de ellos unido a la entrada de aceite, y el otro, a un acumulador de oleoneumático y a un manómetro indicador de la presión en el circuito de aceite. Previo a su colocación en el bastidor las probetas son refrentadas.

Las probetas se colocan por parejas en el bastidor como muestra la Figura 3.4. Una vez colocadas se aplica la carga, hasta el 40% de la tensión de rotura del hormigón, llegado a esta tensión se mantiene constante durante todas las lecturas de la deformación por fluencia.



Figura 3. 4. Bastidor de carga

3.3 DOSIFICACIÓN DE PARTIDA

En Julio de 2009 se realizaron unos trabajos previos en PROMSA por encargo de Sergio Carrascón del IECA, bajo la dirección de Domènec Masó, a cuyos resultados se ha podido tener acceso. En lo que sigue se presentan dichos resultados con objeto de dar continuidad a la experiencia realizada y tener en un solo documento, el conjunto de resultados de las distintas campañas.

3.3.1 Fabricación de las probetas

El objetivo de estos trabajos era poder establecer unas dosificaciones de partida para los posteriores estudios en el LTE. Se realizaron en los mismos laboratorios de PROMSA en amasadas de 100 litros de hormigón HA-25-B-20/IIa habiéndose fabricado 8 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura con una consistencia de $6-9 \pm 1$ cm. Las probetas fueron fabricadas según y conservadas con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 83301:91.

En la Tabla 3.2 se presentan las 6 dosificaciones utilizadas, 3 de ellas (P1, P2, P3) con un contenido en filler de 175 kg/cm^3 cumpliendo con la normativa de la EHE-08 a las cuales llamaremos dosificación patrón (P), y otras tres (F1, F2, F3) con 275 kg/cm^3 de filler objeto del estudio y a las que llamaremos dosificación filler (F).

Componentes (en kg/m^3)	P1	P2	P3	F1	F2	F3
Arena 0 - 4	1.026	1.026	1.026	926	926	926
Gravilla 4 - 10	106	106	106	106	106	106
Grava 10 - 20	773	773	773	773	773	773
Agua	165	165	165	151	158	158
Cemento	231	231	231	231	231	231
Filler	175 (83)	175 (83)	175 (83)	275 (191,4)	275 (191,4)	275 (191,4)
PF 75 (l) (%)	2,2 0,8	1,93 0,7	1,93 0,7	2,2 0,8	2,2 0,8	1,93 0,7
Viscocrete 5940 (l) (%)	1,41 0,51	1,24 0,45	1,24 0,45	1,65* 0,6	2,82 1,03	2,48 0,9
Código	0/4833	0/4834	0/4836	--	0/4835	0/4837

*en F1 el contenido inicial era de 1,41l pero por problemas de consistencia se tuvo que añadir 0,24l más

Tabla 3. 2. Dosificaciones utilizadas en los trabajos previos

En la dosificación P podemos ver como de P1 a P2 hay una reducción en el contenido de PF 75 (fluidificante) i de Viscocrete 5940 (superfluidificante) a causa de el resultado obtenido en el ensayo de cono de Abrahms (Tabla 3.3) demasiado extenso. Se puede observar que entre las dosificaciones P2 y P3 no hay ninguna diferencia, ya que de los resultados de hormigón fresco de P2 se consideró que la dosificación era acertada.

Para la dosificación F se obtuvo un hormigón demasiado duro para F1 por ésta razón se descartó para los ensayos de hormigón endurecido. Para F2 otra vez como ocurrió con P1 el cono de Abrahams fue demasiado extenso y en F3 se procedió a rebajar la cantidad tanto de fluidificante como de superfluidificante.

Las probetas P1, P2 y F1 y F2 se dosificaron con intención de matizar y encontrar la combinación ideal de los diferentes elementos, por esta razón P3 y F3 se fabricaron en días diferentes a las anteriores. El filler que aparece entre paréntesis en las dos dosificaciones es el añadido de forma expresa, ya que el resto hasta la cantidad señalada es aportado por los finos de los áridos. Al aumentar el contenido de filler en las probetas F la cantidad de Arena 0/4 disminuye a diferencia de la grava i la gravilla que se mantienen iguales en F y P.



Figura 3. 5. Curado de las probetas

Una vez fabricadas las probetas se dejaron almacenadas y sin desmoldar durante 24 horas en condiciones de temperatura ambiente de $21^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$ evitando cualquier tipo de movimiento, golpes, vibraciones y pérdida de humedad. En la Figura 3.5. se puede ver una imagen de la conservación de las probetas antes de entrar en la cámara de curado dentro de bolsas de plástico para que conservar la humedad. Pasadas 24 horas de la confección de las probetas se desmoldaron y transportaron al laboratorio para su curado en cámara de curado con humedad relativa ambiente, superior al 95% donde quedaron hasta el momento del ensayo.

3.3.2 Resultados en estado fresco

A cada amasada, al hormigón en estado fresco se le hicieron las pruebas ya citadas: cono de Abrams con el que obtenemos la consistencia, densidad, aire ocluido los resultados de los cuales se encuentran en la Tabla 3.3.

Como se ha comentado anteriormente con la dosificación P1 se obtuvo un cono muy extenso, por eso se rebajó la cantidad de fluidificante y superfluidificante,

hecho que demuestra el cono de 7 cm conseguido en P2. La densidad entre P1 y P2 aumenta, razón por la cual el aire ocluido disminuye. Destacar que aunque en P2 y P3 se utilizó la misma dosificación, los resultados de los ensayos al hormigón fresco son diferentes obteniéndose 1 cm más de cono, menor densidad y por tanto más aire ocluido en P3. En todos los casos la relación a/c usada fue de 0,6.

La dosificación F1, se desechó por ser demasiado dura incluso después de añadir agua después del aditivo, en consecuencia para F2 se obtuvieron resultados del cono de Abrahams demasiado blandos, finalmente con la dosificación F3 se obtuvo un cono razonable y dentro del rango esperado ($6-9 \pm 1$ cm). Entre F2 y F3 la densidad aumenta por la reducción de aire ocluido en la mezcla. En todos los casos la relación a/c fue de 0,57.

Temperatura ambiente (°C) 30-31	P1	P2	P3	F1	F2	F3
Contenido filler (kg/m ³)	175	175	175	275	275	275
Cono (cm)	13	7	8	1	12	8
Agua después del aditivo (l)	0	0	0	0,7	0	0
a/c	0,6	0,6	0,6	0,57	0,57	0,57
Densidad (kg/m ³)	2315	2400	2350	--	2318	2453
Aire (%)	4,8	3,2	3,5	--	5,1	3,8
Código	0/4833	0/4834	0/4836	--	0/4835	0/4837

Tabla 3. 3. Resultados del hormigón fresco de cada amasada .

Cabe destacar que para obtener una misma consistencia plástica (8 cm del cono de Abrahms) en P2 y F3 se necesita menor relación a/c en F que en P, ya que los finos mejoran la manejabilidad para una misma cantidad de agua como afirma Betrandy (1986) en sus estudios.

3.3.3 Resultados en estado endurecido

Al hormigón en estado endurecido se le realizaron los siguientes ensayos, ensayo Brasileño y resistencia a compresión a 7, 28 días y penetración de agua y sirvieron para obtener las pertinentes propiedades

La Figura 3. 6. presenta los valores medios obtenidos de la resistencia a compresión a 7 y 28 días y tracción a 28 días. Estos valores son las medias de dos probetas, y están dentro del rango esperable de la EHE-08 ($f_{ck} = 25$ MPa y $f_{cm} = 33$ MPa) a excepción de la muestra P1, que como ya se ha comentado anteriormente obtuvo una consistencia demasiado blanda. La resistencia media a compresión a 7 días representa el 88,73% de la resistencia media a compresión a 28 días.

Los resultados a resistencia tracción obtenidos se muestran en la Tabla 3.5. Según la EHE-08 el valor medio esperado para $f_{ctm} = 2,6$ MPa y ésta debe ser el 10,3% de la resistencia media a compresión. Los resultados obtenidos están por debajo de la norma a excepción de F2 en lo que se refiere a la resistencia media a tracción, a diferencia de la relación entre resistencia media a compresión y resistencia media a tracción que todos los resultados están por encima de la norma.

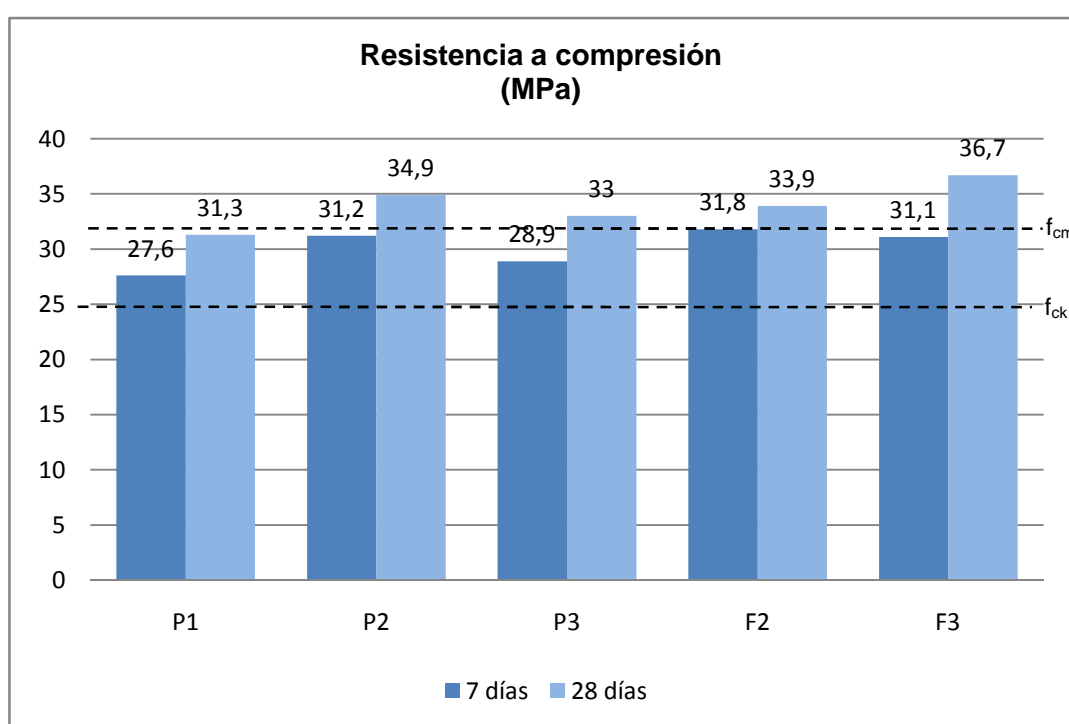


Figura 3. 6. Resistencia media a compresión a 7 y 28 días

Resistencias (MPa)	f_{cm}		f_{ctm}	f_{cm}/f_{ctm} (%)
	7 días	28 días	28 días	28 días
P1	27,6	31,3	2,5	15,8
P2	31,2	34,9	2,6	14,7
P3	28,9	33,0	2,4	14,7
F2	31,8	33,9	2,6	15,6
F3	31,1	36,7	2,6	14,0

Tabla 3. 4. Valores medios de resistencia media a compresión (f_{cm}) y resistencia a tracción (f_{ctm}) de las diferentes masas.

La Tabla 3.6 muestra los valores obtenidos para el ensayo de penetración de agua. Los valores máximos, admitidos por la EHE-08, son 50 mm para la penetración máxima y 30 mm para la penetración media. A la vista de los resultados obtenidos podemos concluir que las dosificaciones utilizadas, cumplen con la norma.

	Penetración (mm)	
	máxima	media
P1	33,0	19,8
P2	30,5	17,7
P3	31,5	20,6
F2	37,0	21,9
F3	30,0	19,0

Tabla 3. 3. Valores medios de los ensayos de penetración de agua en mm

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores hemos visto la aportación de los finos a un hormigón convencional, y se ha planteado la posibilidad de aumentar el límite marcado por la EHE-08 en relación a ésta materia fijado en 175 kg/m^3 . El Capítulo 3 nos muestra la planificación de la campaña experimental llevada a cabo para probar si dicho aumento es posible en base a los ensayos realizados en la empresa PROMSA.

El objetivo del presente capítulo, es dejar constancia de la dosificación utilizada, mostrar los ensayos realizados en función de la propiedad mecánica analizada y su posterior análisis centrándose en el aumento de finos en la dosificación del hormigón. La comparación con la dosificación sin el aumento del contenido en finos nos permitirá extraer consecuencias de la aportación de los finos en el hormigón.

Los métodos utilizados tanto en la fabricación de las probetas como en la realización de los ensayos se encuentran detallados en el capítulo anterior. Las probetas fueron fabricadas por dos empresas distintas (ESCOFET y PROMSA) como se comentará en el siguiente apartado y ensayadas en el LTE de la UPC.

4.2 DOSIFICACIONES REALES

Los resultados obtenidos en los laboratorios de PROMSA presentados en el capítulo anterior sirvieron de base para definir las dosificaciones que son objeto de esta tesina. El hormigón para los ensayos realizados durante dos jueves del mes de febrero del 2010 (días 11 y 18), fue suministrado por PROMSA desde la sede de la empresa en la planta que tienen Sant Vicenç dels Horts.

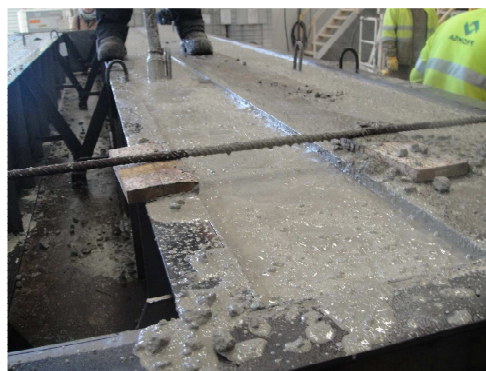
Se realizaron un total de 25 probetas por cada dosificación de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, las probetas fueron realizadas por el personal de ESCOFET. El hormigonado se realizó en torno a las 10:00 horas con temperaturas bajas (entorno a los 10°C) y con un tiempo máximo de transporte estimado de 30 minutos.

La razón por la cual se fabricaron las probetas con dos empresas diferentes es que el objetivo de esta tesina forma parte de un estudio más amplio, en el cual también se ensayaron un conjunto de vigas. En el LTE no se disponía de la maquinaria necesaria para ensayar dichas vigas, así que se optó por hacerlo en los laboratorios que dispone ESCOFET en Martorell (a pocos km de la central de PROMSA en Sant Vicenç dels Horts) ya que los de la misma empresa PROMSA se sitúan demasiado lejos para que el tiempo de transporte del hormigón fuera óptimo.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran parte del estudio realizado en colaboración de PROMSA, ESCOFET y el LTE, del cual ésta tesina es una parte. El estudio era el análisis del comportamiento del hormigón con alto contenido en finos, en diferentes elementos. En la Figura 4.1 se observa el hormigonado y la compactación de unas vigas prefabricadas con la dosificación PT, y en la Figura 4.2 se puede ver una de las vigas anteriores ya endurecida.



(a)



(b)

Figura 4. 1. Hormigonado(a) y compactación (b) de las vigas de la dosificación PT



Figura 4. 2. Vigas prefabricadas de hormigón de la dosificación PT

En la Tabla 4.1. se pueden observar las dosificaciones utilizadas en las dos series elaboradas: la serie Patrón (PT) correspondiente al contenido de 175 kg/cm^3 y a la serie Filler (FL) con un contenido de 275 kg/m^3 de filler así como las dosificaciones de partida obtenidas en el laboratorio de PROMSA (dosificación teórica).

Observando ambas dosificaciones se puede observar que existen ciertas diferencias en la dosificación que consideramos teórica y en la utilizada finalmente. Una de las justificaciones de estas diferencias es el plazo transcurrido entre ambas fabricaciones (julio 2009 – febrero 2010). Al fabricar unas probetas en periodo estival y las siguientes en periodo invernal hay que tener en cuenta cambios en los factores ambientales para el hormigonado, ya que entre los dos periodos puede haber una diferencia de aproximadamente unos 15°C .

Remarcar que la cantidad de agua utilizada para PT, es un error del personal que fabricó las probetas. La dosificación de agua inicial era de 169 l pero por una falta de control finalmente se acabaron utilizando 195 l en esta dosificación.

Tanto en PT como en FL el objetivo es conseguir un hormigón con una resistencia mínima a compresión de 25 MPa a 28 días, consistencia blanda (8 – 10 cm de cono de Abrams) que respete las condiciones del hormigón para ambiente IIa (relación agua/cemento = 0,6 y contenido de cemento de 275 kg/m^3). Para ello el cemento será un tipo CEM II/A-L conseguido con un 84% de CEM I 52,5 R (236 kg/m^3) y añadiendo 16% de adición caliza (39 kg/m^3).

Componente (kg/m ³)	Serie			
	PT	FL	P3	F3
Arena 0/4	1008	908	1.026	926
Árido 4/10	107	107	106	106
Árido 10/20	778	778	773	773
Agua	195	174	165	158
CEM I 52,5 R	236	236	231	231
Filler	175 (66)	275 (176)	175 (83)	275 (191,4)
Polifuncional	1,97	1,97	1,93	1,93
Superfluidificante	1,41	2,53	1,24	2,48

Tabla 4. 1. Dosificaciones utilizadas en las diferentes series

4.2.1 Fabricación de las probetas

La fabricación de las probetas para ambas dosificaciones se realizó en dos días distintos y según los métodos especificados en el Capítulo 3. En la Figura 4.3. se puede ver una imagen de las probetas que se utilizaron para la dosificación de 175 kg/m³ de finos.



Figura 4. 3. Probetas usadas para la dosificación PT

En la Tabla 4.2. se especifica los resultados de % de finos y del SE₄ (equivalente de arena) que como se ha visto en el Capítulo 2 exige la EHE-08. Tanto en PT como en FL se obtienen valores dentro del rango especificado por la EHE-08.

En el caso del cono de Abrams se esperaba un cono entre 8 y 10 cm, requisito que cumple FL, pero no PT por el exceso de agua que ya se ha comentado anteriormente.

Ensayo	PT	FL	EHE
SE ₄	74	72	<75
% finos	0,5	0,3	< 10%
Cono de Abrams (cm)	13	9	-

Tabla 4. 2. Ensayos especificados por la EHE-08

En la Tabla 4.3. se especifica la granulometría usada en las dos dosificaciones para el rango de las arenas 0/4.

tamiz	% que pasa		EHE
	PT	FL	
4	99,28	98,84	100 - 85
2	67,03	78,4	96 - 62
1	37,75	44,37	84 - 40
0,5	22,94	25,67	60 - 18
0,25	14,34	15,21	30 - 6
0,125	10,63	9,99	23 - 0
0,063	9,2	7,67	*

*ver el apartado 2.5.2

Tabla 4. 3. % que pasa para la fracción 0/4 y requisitos de la EHE-08

En la Tabla 4.3. se puede observar el % que pasa para la fracción 4/10 de la gravilla y 10/20 de la grava utilizada para ambas dosificaciones.

tamiz	4/10	10/20
25	100	100
20	100	99,29
14	100	49,26
10	93	14,28
6,3	24	0,78
4	2	0,78
2	2	0,78
1	2	0,78
0,5	1	0,78
0,25	1	0,78
0,125	1	0,78
0,063	1,3	0,71

Tabla 4. 4. % que pasa para la gravilla y la grava

Las fichas completas de los áridos utilizados se pueden encontrar completas en el Anejo A al final del documento separadas por fracciones

El llenado de las probetas fue realizado por el personal de ESCOFET. La Figura 4.4. muestra una imagen de la dosificación FL una vez acabadas de hormigonar.



Figura 4. 4. Llenado de las probetas de la dosificación FL

4.3 RESULTADOS HORMIGÓN ENDURECIDO

Las características del hormigón endurecido analizadas son la resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días, la resistencia a tracción a 28 días y el módulo de elasticidad.

En los ensayos realizados, la EHE-08 exige que se ensayen más de una probeta. En las tablas del presente capítulo, se calculan los valores medios y también se da el valor del coeficiente de variación (CV), el cual es una medida de la dispersión de muestras a escalas diferentes. Las medidas de dispersión, muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será la media. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos (Canavos, 1998), y dan una idea de lo fiable que es un ensayo o no. En hormigón se considera un valor razonable CV inferiores al 10%. El CV se calcula según la siguiente expresión:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [4.1]$$

donde: σ : desviación típica
 \bar{x} media aritmética de la muestra que estamos considerando

En el Anejo B, se puede encontrar información complementaria sobre los ensayos realizados en el LTE de la UPC.

4.3.1 Resistencia a compresión

De las dos dosificaciones utilizadas PT y FL se realizaron los ensayos a compresión a 7, 28 y 90 días. Los resultados de estos ensayos se recogen en la Tabla 4.5.

Los resultados promedios (f_{cm}) experimentales observados están en torno a los 25 MPa, calculando el f_{ck} según la expresión [3.1] obtenemos 18,52 MPa para PT y 22,57 MPa para FL. Ambos valores no cumplen con el requisito de f_{ck} , estando muy por debajo los valores de PT. Los resultados para 28 días deberían equivaler a la resistencia característica (f_{ck}) del hormigón utilizado $f_{ck} = 25$ MPa.

		PT	FL
7 días	C1	19,37	19,33
	C2	20,00	18,35
	Media	19,69	18,84
	CV	2,25%	3,67%
28 días	C1	31,35	24,68
	C2	31,22	24,14
	C3	28,25	24,39
	Media	27,12	24,40
	CV	5,21%	1,11%
90 días	C1	31,35	25,77
	C2	31,22	27,13
	Media	31,29	26,45
	C	0,29%	3,64%

Tabla 4. 5. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días

En la misma Tabla 4.5, puede verse como la dosificación PT consigue mayores resistencias que FL siendo la diferencia entre ambas más significativa a mayores edades (a 28 y 90 días las diferencias pueden alcanzar valores del 10 y 15% respectivamente estando solo en un 5% a los 7 días).

Por la mayor cantidad de pasta fina en el hormigón, la hidratación que se produce es más lenta, así es de esperar que la diferencia disminuya cuando la muestra PT alcance la estabilidad al cabo de un año (Kumar Mehta, 1986). En la Figura 4.5. se observa la evolución del hormigón con el tiempo y la diferencia entre ambas dosificaciones.

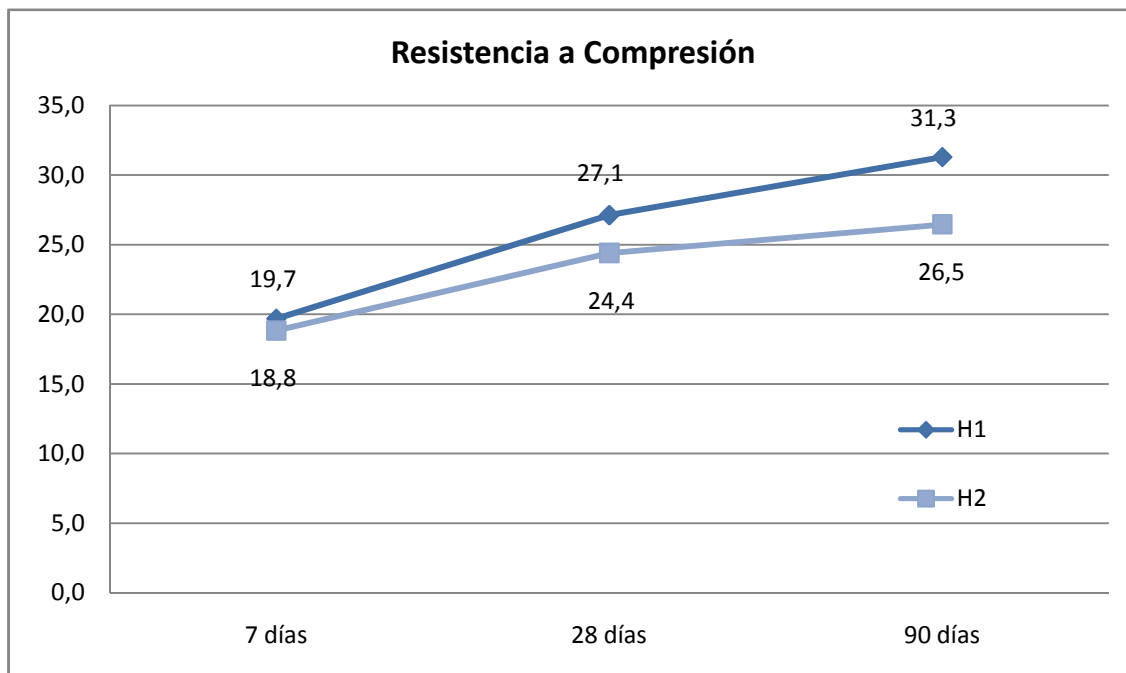


Figura 4. 5. Resistencia media a compresión

El hormigón gana resistencia con la edad, una vez acaba el fraguado empieza el endurecimiento del hormigón, las reacciones de hidratación alcanzan los constituyentes del cemento que todavía no se han hidratado, provocando un completo endurecimiento de la pasta. En PT la resistencia a compresión a 7 días representa el 72,7% de la resistencia a 28 días, y el 115% para la resistencia a 90 días. Los valores para FL son 77,1% para 28 días y 108,6% para 90 días. Así se consiguen mayores resistencias iniciales con un mayor contenido en finos en el hormigón en comparación con la resistencia a 28 días.

Como complemento del estudio realizado, se ha tenido acceso a los resultados de los ensayos realizados por el departamento de Materiales de Construcción de la Escola de Camins Canals i Ports de Barcelona de la UPC de las mismas dosificaciones PT y FL. Así se disponen de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, penetración de agua y succión capilar.

La Tabla 4.6. muestra los resultados de la resistencia a compresión y del módulo de deformación a 28 días. Como se puede comprobar otra vez nos encontramos con valores que muestran la misma tendencia que los obtenidos en el LTE, aunque el valor absoluto de éstos queda por debajo. FL obtiene una resistencia a compresión un 10% inferior que PT y con tendencia a crecer. Entre los valores del módulo de deformación se ve menor diferencia a la edad estudiada que en los resultados obtenidos en el LTE.

Propiedad	PT	FL
f_{cm} (MPa)	40,2	37,5
CV (%)	1,2	1,6
E (MPa)	30,8	29,3

Tabla 4.6. Resultados de f_c y E_c obtenidos por el departamento de Materiales de Construcción de la UPC

Por lo que hace a los resultados de penetración de agua y succión capilar (mide la absorptividad de un material) que se encuentran en la Tabla 4.7., nos dan a entender que la dosificación FL tiene un mayor contenido de poros por tener valores mayores en ambos ensayos, esto también justifica una menor resistencia a compresión del hormigón con más finos.

Propiedad	PT	FL
Penetración agua (cm)	12,1	13,2
CV (%)	5,7	4,5
absortividad ($g/cm^2(h)^{1/2}$)	0,048	0,061

Tabla 4.7. Resultados de penetración de agua y succión capilar obtenidos por el departamento de Materiales de Construcción de la UPC

A la vista de los resultados obtenidos en PT y FL, no se puede evitar compararlos con los resultados obtenidos en los ensayos previos en PROMSA ya comentados en el Capítulo 3. La Tabla 4.8. muestra los valores medios de la resistencia a compresión para 7 y 28 días obtenidos tanto en PROMSA como en el LTE y los coeficiente de variación obtenidos en cada caso.

	175 kg/m ³		275 kg/m ³	
	PROMSA	LTE	PROMSA	LTE
7 días (MPa)	29,23	19,69	31,45	18,84
CV (%)	6,24	2,25	1,57	3,67
28 días (MPa)	32,73	27,10	35,30	24,40
CV (%)	5,50	5,210	5,60	1,11

Tabla 4. 8. Comparación resultados PROMSA y LTE

Las diferencias entre los resultados en ambos laboratorios son bastante significativas, llegando a valores de incluso 13 MPa. Dados estos resultaos se plantea

el porqué de estas diferencias y de dichas bajadas en la resistencias de las dosificaciones en el LTE. Los factores que pueden justificar ésta bajada en la resistencia a compresión son cuatro: cambios en la dosificación, fabricación de las probetas, laboratorio que ejecuta los ensayos y conservación de las probetas.

En relación a los *cambios en la dosificación* en comparación con la dosificación de salida (apartado 4.2), los cambios significativos son en relación al contenido de agua y cemento. Se puede comprobar que la cantidad de salida de agua para PT fue de 165 l, y la que se usó para fabricar las probetas ensayadas en el LTE fue de 195 l. En el caso de FL las cantidades fueron de 158 l y 174 l respectivamente. Aunque en ambos casos la cantidad de cemento pasó de 231 kg/m³ a 236 kg/m³ para mantener la relación agua/cemento, es lógico pensar que el aumento de agua fue excesivo, ya que un aumento de agua implica un aumento de la porosidad en la mezcla y por tanto una reducción en su resistencia (González Martínez, 1992).

Si bien la resistencia a compresión depende, entre otros factores, de las características reológicas del material, de las condiciones de curado, la relación agua/cemento, el nivel de compactación, la cantidad de cemento... a la vista de los resultados obtenidos no se puede despreciar el *factor humano* en la *fabricación del hormigón*. Como ya se ha comentado anteriormente, las probetas para la caracterización mecánica de los ensayos en el LTE fueron realizadas por el personal de ESCOFET, a diferencia de las pruebas hechas en PROMSA que fueron realizadas por el mismo personal de la empresa. Con los mismos materiales, dos personas pueden conseguir hormigones con resistencias distintas aún siguiendo la normativa específica, la experiencia de ambas personas por ejemplo o la misma calibración de las máquinas utilizados son factores determinantes para que los resultados sean unos u otros.

Respeto a la *conservación de las probetas*, ésta fue realizada en ambos casos con bolsas de plástico para conservar la humedad durante las primeras horas, y pasadas las 24 horas fueron desmoldadas y conservadas en la cámara húmeda. Si el procedimiento en la conservación fuera distinto en los dos casos sí que podría ser un factor que alterara la resistencia, pero no es el caso, así que se desestima este factor.

A veces esta dispersión de resultados radica en una variación de la calidad de los áridos suministrados, pero los áridos fueron suministrados en ambos casos por la misma empresa. Aunque sí que es cierto que entre el transcurso de la realización de los dos diferentes hormigones (junio – febrero) pasaron 8 meses, cosa que podría suponer la utilización de diferentes lotes.

La bajada de la resistencia es una suma de los 4 factores nombrados, aunque dada la implicación del agua en la resistencia a compresión, se considera que el factor determinante en la baja resistencia a compresión conseguida es el aumento de agua en las dosificaciones.

4.3.2 Resistencia a tracción

De las dos dosificaciones utilizadas PT y FL se realizaron los ensayos a tracción indirecta a 28 días. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 4.9.

Calculando la f_{ctm} según la expresión [3.4] obtenemos que para $f_{ck} = 25$ MPa (valor teórico) el valor de la resistencia media a compresión es $f_{ctm} = 2,6$ MPa, cumpliendo las dos dosificaciones, tanto PT como FL, con el requerimiento (FL se encuentra en el límite). La diferencia entre PT y FL es del 11%. Autores como Betrandy (1987) afirman que la resistencia a tracción es menos sensible al contenido en finos que la resistencia a compresión. En la cantidad estudiada (275 kg/m^3) se observa que la diferencia con la dosificación patrón es parecida (10% en compresión y 11% en tracción), así pues, Se tendría que hacer un estudio a otras edades para comprobar si la afirmación es cierta con esta cantidad.

	PT (Mpa)	FL (Mpa)
C1	3,07	2,63
C2	2,87	2,61
C3	2,85	2,5
Media	2,93	2,58
CV	4,07%	2,74%

Tabla 4. 9. Resistencia a tracción

Como se ha comentado en el Capítulo 2, la resistencia a tracción depende básicamente de la adherencia entre el árido y el mortero. Los finos pueden disminuir esta adherencia, formando una capa sobre la superficie del árido grueso (González Martínez, 1992). A la vista de los resultados el aumento hasta 275 kg/m^3 si que baja la resistencia a tracción pero no hasta valores preocupantes.

La resistencia a tracción del hormigón se relaciona a menudo con la resistencia a compresión. En la Tabla 4.10. se presentan la relación entre la resistencia media a tracción obtenida y la resistencia media a compresión a 28 días de edad.

	PT	FL
f_{cm}/f_{ctm} (%)	10,81	10,57

Tabla 4. 10. Relación resistencias a 28 días

Según la EHE-08, la resistencia a tracción representa entre un 8 y un 12 % de la resistencia a compresión a 28 días, así pues y vistos los resultados de la Tabla 4.9. tanto PT como FL obtienen valores dentro del rango requerido.

4.3.3 Módulo de elasticidad

De las dos dosificaciones utilizadas PT y FL se realizaron ensayos para determinar el módulo de deformación longitudinal a 7, 28 y 90 días, los resultados de los cuales se presentan en la Tabla 4.11., así como el valor de la tensión alcanzado para romper a compresión las probetas durante los ensayos.

En las dos dosificaciones observamos como el módulo de deformación (E_c) crece con la edad del hormigón alcanzando, en todas las edades, valores superiores en PT que en FL.

		PT (MPa)		FL (MPa)	
		E	f_c máx.	E	f_c máx.
7 días	C1	27,74	21,76	27,43	20,15
	C2	27,74	21,46	27,73	19,52
	media	27,74	21,61	27,58	19,84
28 días	C1	30,90	30,00	29,91	24,85
	C2	30,26	27,48	29,49	25,39
	C3	32,08	28,59	28,63	23,88
	media	31,08	28,69	29,34	24,71
90 días	C1	32,30	29,65	32,30	29,90
	C2	32,30	32,26	32,30	27,83
	media	32,30	30,96	31,12	28,87

Tabla 4. 11. Valores de los módulos de deformación

Destacar el valor obtenido en PT de la tensión de rotura a compresión a 28 días, se obtienen valores entre los 25 y 30 MPa valores ligeramente superiores en comparación a los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión. De todos modos los valores de la tensión de rotura (f_c) son solamente orientativos, ya que en el ensayo del modulo elástico las probetas llegan a la rotura después de varios ciclos de carga y descarga.

La Figura 4.6. muestra la evolución del módulo de elasticidad con el tiempo. A 7 días de edad se obtienen valores parecidos para ambas dosificaciones. El E viene influenciado por el módulo elástico del árido y el módulo elástico del mortero (Neville, 1996), así pues en las primeras edades, cuando el mortero no ha acabado de endurecerse, el esqueleto granular es el componente que le proporciona rigidez. A medida que la pasta endurece adquiere importancia, por esta razón el E_c tiene un crecimiento mayor entre 28 y 90 días en FL que en PT, ya que el mortero de FL tiene un endurecimiento más lento por el alto contenido en finos que retienen el agua.

La EHE-08 para un hormigón de resistencia característica $f_{ck} = 25$ MPa espera un valor de $E_{cm} = 27,26$ MPa a 28 días. Ambas dosificaciones cumplen con el requisito. El aumento del contenido de finos en las mezclas no influye favorablemente

en el módulo de elasticidad (se ha de tener en cuenta que un módulo menor nos dará una deformación mayor para una misma tensión), ya que hace que éste disminuya, estando el valor de E a 90 días, incluso por debajo del obtenido por un hormigón convencional a 28 días.

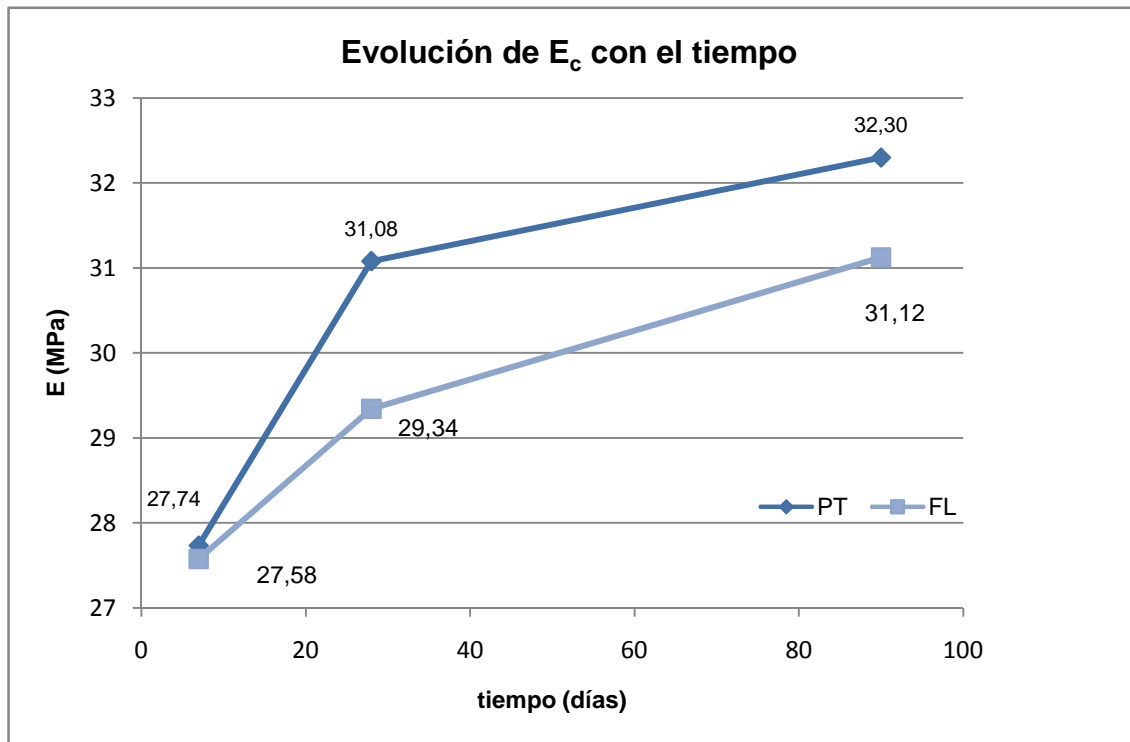


Figura 4. 6. Evolución de E_c con el tiempo

4.4 DEFORMACIONES DIFERIDAS

En los apartados anteriores se han presentado los resultados relativos a las propiedades en estado endurecido, el presente apartado analiza el comportamiento diferido (retracción y fluencia) de las dosificaciones utilizadas a través de los ensayos de retracción y fluencia realizados durante la campaña experimental ya comentada en el Capítulo 3.

En las figuras Figura 4.7. se pueden ver imágenes de los ensayos de las deformaciones diferidas. En las imágenes podemos observar un detalle de la galga utilizada para la medición de la deformación, en la siguiente la medición de la probeta a la llegada al laboratorio del LTE, la medición de la deformación durante la carga de la probeta y finalmente una imagen mientras se pesa la probeta.

En el Anejo C del presente documento se pueden encontrar los resultados de cada probeta ensayada.



Figura 4. 7. En sentido horario a)detalle de la probeta, b) medición a la llegada al LTE, c) peso de la probeta, d) medición durante la carga

4.4.1 Retracción

Las tablas Tabla 4.12. y Tabla 4.13. muestran los valores medios obtenidos de los ensayos realizados de retracción para las dosificaciones PT y FL respectivamente. Las muestras se miden una vez desmoldadas en el LTE y se vuelven a medir cuando se sacan para su ensayo en la cámara climática al cabo de 33 días, no se disponen de datos entre los 0 y 33 días de edad de las probetas. Las tablas contienen dos series de resultados, la retracción media des de la llegada de las muestras al LTE y la

retracción media medida des de la entrada de las muestras en la cc. Llamaremos deformación por retracción final o retracción final a la deformación del último dato del que se dispone.

La Tabla 4.10. muestra los resultados para la dosificación PT. La deformación por retracción una vez las probetas se encuentran en la cc es del 52,9% respecto la retracción total y en los 7 siguientes días aumenta hasta el 70,4%. En solo 14 días la retracción alcanza casi $\frac{3}{4}$ partes de la retracción total. La introducción de las probetas en la cc frena la retracción ya que su aumento es mucho más lento.

Edad (días)	32	33	34	36	39	46	60	92	124
t. des de entrada en cc (días)	0	1	2	4	7	14	28	60	92
des de llegada a LTE (-mm/m)	291,6	323,3	338,4	366,2	388,2	411,9	461,1	484,2	551,7
CV (%)	37,3	35,9	35,6	31,9	29,1	0,8	0,6	0,5	0,3
des de entrada en cc (-mm/m)	0,0	31,7	46,8	74,7	96,6	120,3	169,5	192,6	260,2
CV (%)	0,0	28,8	36,1	10,9	5,3	5,97	7,87	8,1	5,7

Tabla 4. 12. Valores de la retracción de la dosificación PT

La Tabla 4.11 muestra los resultados para la dosificación FL. La retracción antes de la introducción de las probetas en la cc es solo un 3,8% de la deformación final, en los siguientes 7 días la retracción aumenta hasta el 28,1% y no llega hasta el 80,1% de la deformación total hasta el día 60. La mayor parte de la retracción se produce entre los días 30 y 60, o lo que es lo mismo una vez ya en el interior de la cc.

Edad (días)	32	33	34	36	39	47	60	92	122
t des de entrada en cc (días)	0	1	2	4	7	15	28	60	90
des de llegada a LTE (-mm/m)	13,6	19,0	39,7	64,6	101,3	192,0	257,2	327,7	360,3
CV (%)	471,1	304,8	82,9	55,3	30,4	2,9	1,28	0,8	0,6
des de entrada en cc (-mm/m)	0,0	5,3	26,1	51	87,7	178,4	243,6	314,1	346,7
CV (%)	0,0	233,3	148,2	60,1	51,0	20,7	15,91	14,9	8,9

Tabla 4. 13. Valores de la retracción de la dosificación FL

La Figura 4.7. presenta la evolución de la deformación por retracción de las probetas des de la llegada de éstas a la cc. La retracción observada entre los 0 y 33 días tanto para PT como FL, se debe a los procesos de hidratación internos que sufre el hormigón que hacen que el volumen de la probeta disminuya, es decir con la hidratación del cemento se produce una reducción de volumen en la pasta de cemento que asociada a la estructura rígida del esqueleto granular da origen a la reducción del volumen de hormigón y a la formación de poros. Estos poros, al estar las probetas sumergidas en agua, dan continuidad a las reacciones de hidratación y reducen la deformación de los mismos.

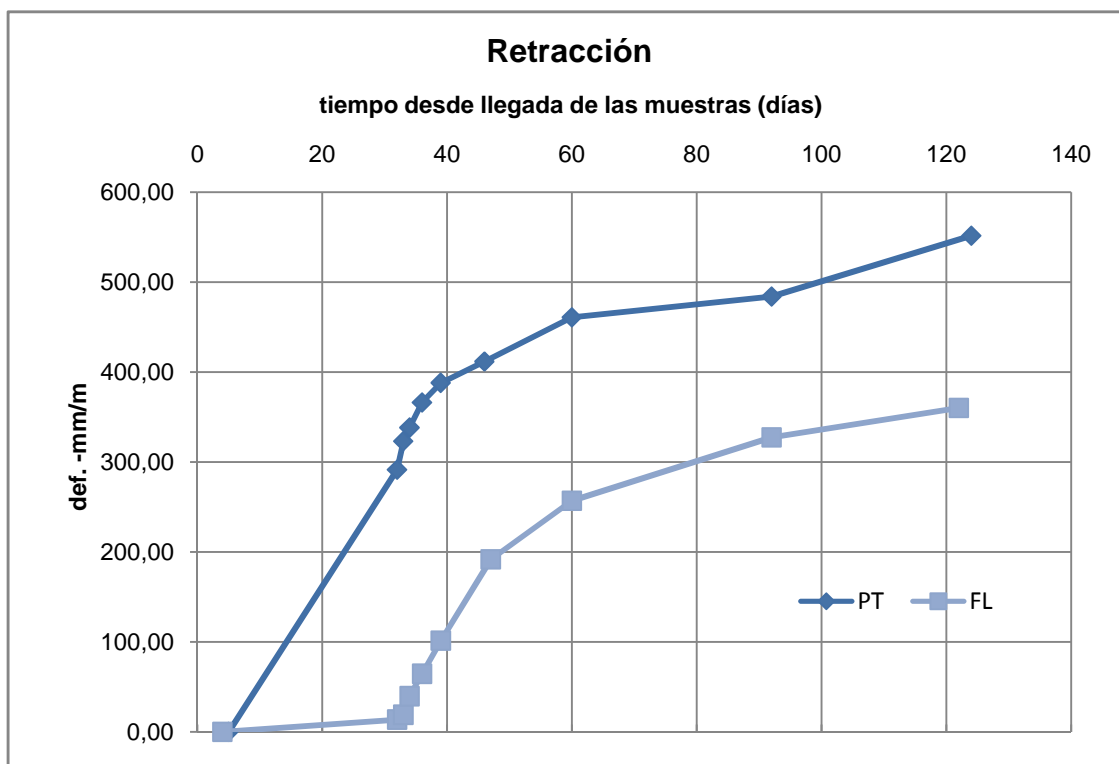


Figura 4. 8. Retracción des de la llegada de las probetas al LTE

La Figura 4.7. presenta la evolución de la deformación por retracción des de la entrada de las probetas en la cc. En este tramo la retracción es superior en PT que en FL hasta los 7 días, a partir de entonces la retracción es mayor en FL y también adquiere más velocidad de deformación que en la otra dosificación PT.

Las probetas entran en cc al cabo de 33 días, así pues estas variaciones de volumen, se producen a una edad en la que el cambio volumétrico está restringido por la pasta rígida y por el árido. (Colomer, 1974). Una vez en la cc las probetas se encuentran en situación de humedad relativa del 50% y las variaciones volumétricas vendrán dadas por la pérdida de agua en los capilares.

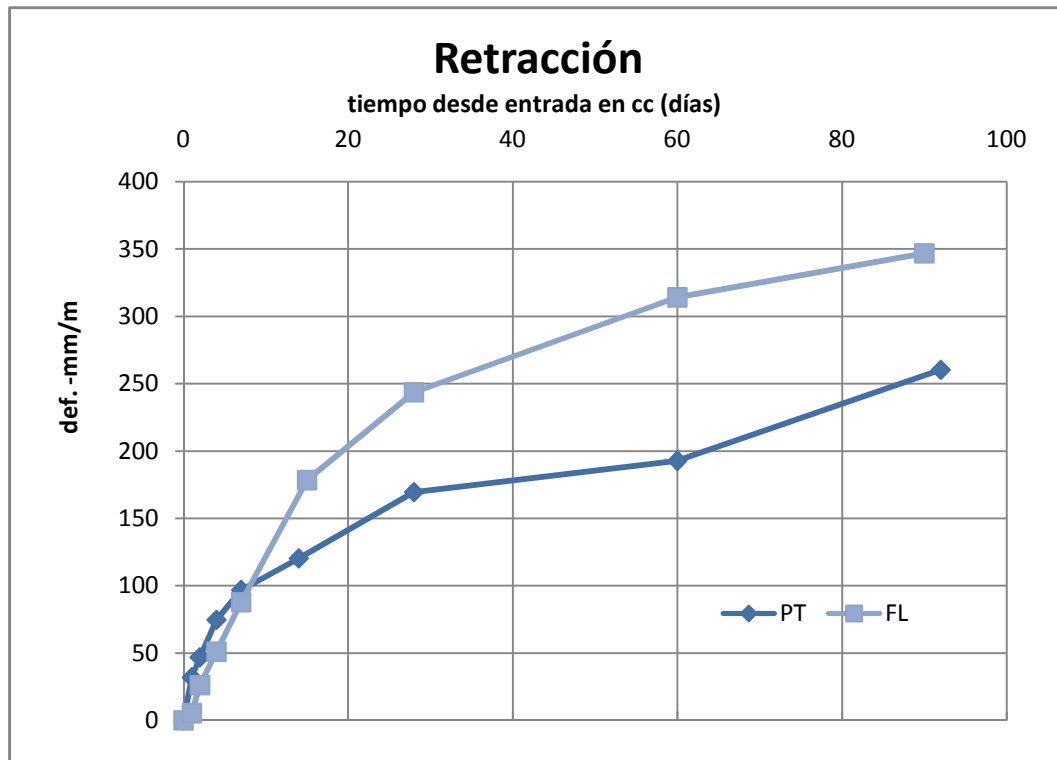


Figura 4. 9. Retracción des de la entrada de las probetas en cc

Los resultados obtenidos nos llevan a la conclusión de que el aumento del contenido del contenido de finos retarda la aparición de la retracción en el hormigón y disminuye su valor en un 65% a 122 días de su fabricación. La mayor parte de la deformación por retracción en el caso de PT se produce antes de entrar en la cámara de curado, no pasa lo mismo con FL que alcanza valores significativos una vez las probetas se encuentran en la cc. Los resultados hasta los 90 días indican que la retracción total seguirá creciendo con el tiempo, como es habitual para cualquier hormigón (Neville, 1996).

4.4.2 Fluencia

Las tablas Tabla 4.14 y Tabla 4.15 muestran los resultados obtenidos en el ensayo de fluencia para las dosificaciones utilizadas PT y FL teniendo en cuenta la temperatura de la cc, la edad de las probetas y el tiempo transcurrido des de la entrada en la cc y por tanto el inicio de su ensayo. Llamaremos deformación por fluencia final o fluencia final a la deformación última de la cual se disponen datos.

Las deformaciones por fluencia se expresan por la diferencia entre las deformaciones medidas en las probetas bajo carga y las probetas sin carga (las usadas para el ensayo de retracción) es decir al valor obtenido de deformación por fluencia + retracción se le resta la deformación por retracción. Retracción y fluencia no son fenómenos independientes, sino que se dan simultáneamente, así pues para su análisis se asume, para las medidas experimentales, linealidad o superposición de efectos (Neville, 1996).

La Tabla 4.14. muestra los resultados del ensayo de fluencia para la dosificación PT. En ella podemos ver como la aplicación de la carga a los 33 días de edad produce una deformación inicial de -115,6 mm/m. El aumento de la deformación es más rápido en los 9 primeros días, ya que en este tiempo, las probetas ya han adquirido el 50% de su deformación total a los 92 días.

Temperatura (°C)	20	18	20	20	20	20	20	20	20
Edad probeta (días)	32	33	34	36	41	46	60	92	124
t inicio carga (días)	0	1	2	4	9	14	28	60	92
Fluencia media (-mm/m)	0,0	115,6	207,1	228,4	344,0	376,9	468,4	596,4	661,3

Tabla 4. 14. . Deformación por fluencia de PT

La Tabla 4.13. muestra los resultados del ensayo de fluencia para la dosificación FL. La deformación inicial al introducir las probetas en la cc y cargarlas es de -198,2 mm/m. Alcanza el 50 % de su deformación total a los 15 días del inicio de la carga.

Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Edad probeta (días)	32	33	34	36	39	47	60	92	122
t inicio carga (días)	0	1	2	4	7	15	28	60	90
Fluencia media (-mm/m)	0,0	198,2	246,2	348,4	452,4	593,8	760,9	956,4	1030,2

Tabla 4. 15. Deformación por fluencia de FL

La deformación inicial depende, entre otros factores, del procedimiento de ensayo, éste hace que las probetas pasen de estar sumergidas en agua a estar en la cc con un ambiente de humedad relativa del 50% y a 20°C. Al empezar a cargar las probetas todavía existe agua de curado en los poros, de aquí la justificación del alto valor (en comparación a la deformación por día de una misma probeta) de la deformación inicial para ambas dosificaciones.

La Figura 4.10. presenta la velocidad de deformación por fluencia de las dosificaciones PT y FL. La deformación es superior en FL des de el inicio de la carga, el aumento de finos hace que la pasta endurezca más lentamente y la deformación elástica sea mayor a cualquier edad. Los resultados cuadran con los valores obtenidos para el módulo de deformación, ya que a mayores edades, y menor módulo de deformación más fluencia (Neville, 1996). A los 92 días de carga la deformación por fluencia es un 64,2% mayor en FL que en PT.

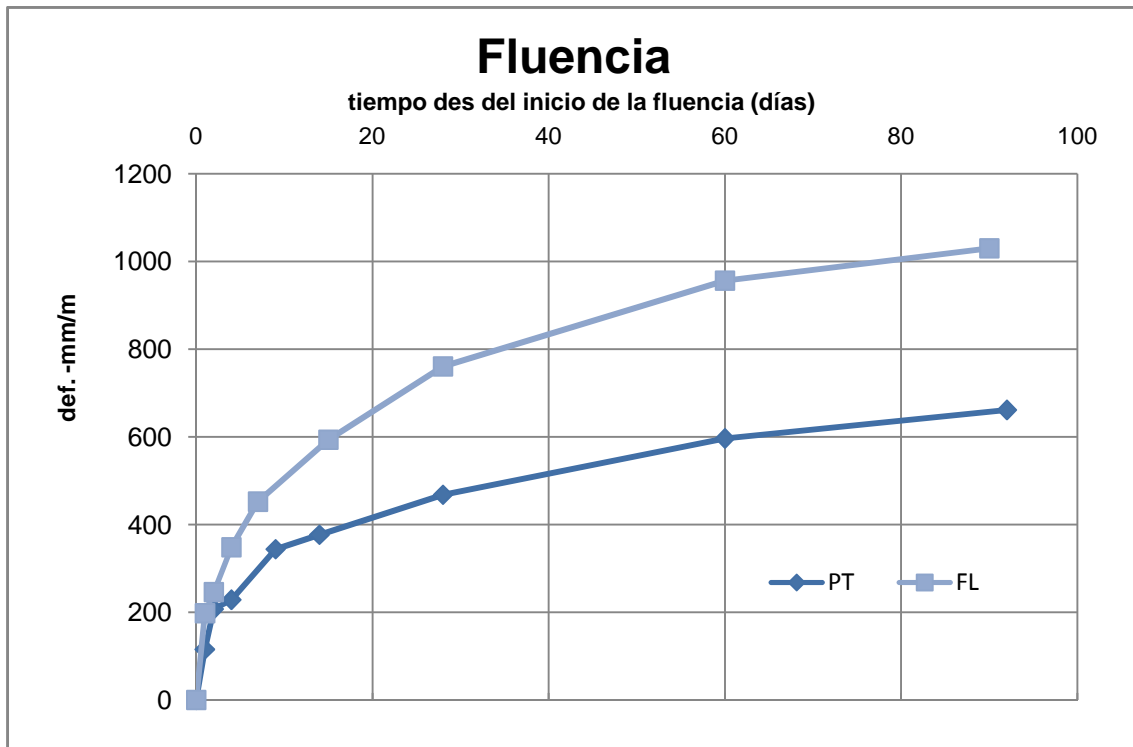


Figura 4. 10. Velocidad de deformación por fluencia PT y FL

El aumento de finos en las mezclas de hormigón produce un aumento de la fluencia, que según las proporciones utilizadas para esta campaña experimental el aumento es del 64%. Un aumento de la fluencia significa un aumento de la deformación elástica antes de llegar a rotura. Podemos considerar éste efecto beneficioso en función del uso que le queramos dar al hormigón.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo, se han desarrollado los aspectos y conceptos considerados más importantes en lo que se refiere al aporte de los finos en el hormigón, así como también se ha analizado la posibilidad de aumentar el contenido de los mismos respecto al valor normativo vigente en la EHE-08 (175 kg/m^3).

En el presente capítulo se presentan tanto las conclusiones generales respondiendo a los objetivos planteados al inicio de la tesina como las conclusiones específicas de cada una de las propiedades estudiadas.

Es extensible a la generalidad de este análisis, que en los ensayos con hormigones hay, inevitablemente, cierto margen de dispersión de resultados, y por ello es preferible considerar tendencias y valores medios que aferrarse excesivamente a valores individuales. Como se ha comentado en el capítulo 4, ésta tesina es solo una pequeña parte de un estudio llevado a cabo por varios departamentos de la UPC, así pues, y para tener una mejor comprensión del comportamiento de estos hormigones, se ha tenido acceso a otros resultados del mismo estudio llevado a cabo por el Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) de la UPC, y se ha comprobado que la tendencia y los resultados de la dosificación estudio son los mismos.

Finalmente se plantean posibles líneas futuras de investigación sobre temas que han surgido a lo largo del trabajo y no se han acabado de tratar en la presente tesina.

5.2 CONCLUSIONES GENERALES

Se han utilizado dos dosificaciones a lo largo de este trabajo, la dosificación Patrón (PT) con un contenido en finos de 175 kg/m^3 en el límite que marca la EHE-08 y otra, Filler (FL), con 275 kg/m^3 en finos, valor por encima del valor establecido por la normativa marcado en función del límite fijado por la misma normativa para hormigones autocompactantes en 250 kg/m^3 . En consecuencia del estudio realizado sobre estas dosificaciones, las principales conclusiones sacadas son las siguientes:

- Respondiendo al primer punto de los objetivos planteados en el capítulo 1, en el estado del conocimiento, se ha visto las principales funciones de los finos en el hormigón, entre las cuales destacan una mejora de la manejabilidad y la compacidad aunque el aumento de su contenido signifique más demanda de agua para una misma consistencia con la consiguiente disminución de la adherencia entre mortero y árido y por tanto disminución principalmente en la resistencia a compresión.
- La normativa con referencia a los finos ha evolucionado hacia una instrucción más permisiva en el contenido total de éstos limitando el contenido en arcillas, a medida que ha ido en aumento la tecnología de los aditivos y la incorporación masiva de estos en el hormigón.
- Se han fabricado un total de 50 probetas, 25 para la dosificación PT y otras 25 para la dosificación FL basándose en unas dosificaciones preparatorias diseñadas en la empresa *PROMSA*. La dosificación final utilizada PT, difiere de la teórica, por un problema de control en la fabricación del hormigón. Se ha de tener cuidado con seguir las dosificaciones teóricas y que las reales no difieran de las primeras, ya que como se ha visto los resultados obtenidos no son los esperados. Las probetas fueron fabricadas por el personal de la empresa *ESCOFET* y ensayadas por el personal del *Laboratorio Técnico de Estructuras* (LTE) de la *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Se ha demostrado que el contenido de finos influye en todas las propiedades estudiadas, si bien algunas son más sensibles que otras. Todas las propiedades mecánicas obtienen resultados que cumplen con los requisitos de la EHE-08. La resistencia a compresión pero, se encuentra en el límite, de todos los ensayos a compresión realizados para el estudio del hormigón con finos, los laboratorios de *PROMSA* y del LMC han obtenido resultados que cumplen con el límite establecido por la EHE-08, no pasa lo mismo con los resultados obtenidos por el LTE. De todos modos, lo que sí que hay que destacar es la disminución que se produce en la resistencia a compresión al utilizar 275 kg/m^3 en las mezclas de hormigón.

- Para plantear un posible aumento del límite del contenido de finos de la EHE-08 se tendrían que realizar algunos cambios en la dosificación para aumentar la resistencia a compresión obtenida. Si bien con hormigones autocompactantes la EHE-08 respalda el contenido en finos hasta 250 kg/m^3 sin una merma en las propiedades del hormigón obtenido, y en otros estudios sobre la misma dosificación filler se obtienen resultados más favorables, no parece tan absurdo proponer un aumento en su límite siendo consciente de la disminución en la resistencia a compresión.
- Uno de los factores por lo que es novedoso este estudio, son los ensayos de las deformaciones diferidas, y más cuando los resultados obtenidos son beneficiosos para estas. Los valores muestran una disminución de la retracción y aumento de la fluencia, que según la función que se le dé al hormigón pueden provocar efectos beneficiosos para éstos.

5.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

En el siguiente apartado se presentan las conclusiones parciales obtenidas en las diferentes etapas del estudio realizado a lo largo de esta tesina en relación a la dosificación filler.

La *resistencia a compresión* disminuye en todas las edades estudiadas, adquiriendo valores del 10% inferior a la dosificación patrón a 28 días. Los resultados respecto a la resistencia característica y media se encuentran justo por debajo del límite marcado por la EHE-08 a la misma edad. La resistencia crece con la edad, si bien a un ritmo inferior que la muestra patrón, la diferencia entre dosificaciones se sitúa en un 15% a los 90 días. Se han observado distintos resultados de la propiedad estudiada y de la misma dosificación en distintos laboratorios atribuibles a, cambios en la dosificación, al proceso de fabricación de las probetas, a los laboratorios que ejecutan los ensayos y al proceso de fabricación de las probetas.

La *resistencia a tracción* es un 11% inferior que la conseguida por la dosificación patrón a 28 días, si bien los resultados obtenidos demuestran que el contenido de finos no es suficiente para que la resistencia a tracción no cumpla con la EHE-08.

Por lo que hace a la *relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción*, se obtiene un valor 2% inferior al de la dosificación patrón, pero dentro del rango permitido por la EHE-08.

Los hormigones obtenidos tienen un *módulo de deformación* del 6% inferior a 28 días de edad, valor por debajo del permitido por la EHE-08. La evolución del módulo es lenta, estando a 7 días en valores parecidos en ambas dosificaciones, pero llegando a resultados a 90 días de edad por debajo de los conseguidos con la dosificación patrón a los 28 días de edad.

El aumento de finos en las mezclas de hormigón retarda la aparición de la *retracción* y disminuye su valor hasta un 65% a los 122 días de su fabricación. La mayor parte de la retracción se produce una vez las mezclas se encuentran en las condiciones de la cámara climática a partir de los 33 días de edad.

La *fluencia* se aumenta en un 60% en las dosificaciones utilizadas a los 90 días, siendo su crecimiento exponencial, y por tanto es de esperar que esta diferencia crezca.

5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez planteada una primera dosificación para el contenido en finos de las mezclas de hormigón de 275 kg/m^3 se plantea la posibilidad de realizar nuevas campañas experimentales con la variación de diferentes parámetros. Así las futuras líneas de investigación se enfocan en:

- La Creación de más series, ampliando y cogiendo valores intermedios de contenido de finos, pudiendo así obtener una recta de regresión lineal para cada propiedad estudiada y así ajustar mejor el valor límite que nos dé unos resultados dentro de los parámetros permitidos por la EHE-08 en lo que a propiedades del hormigón se refiere
- En la línea de aumentar el contenido de finos estudiar el comportamiento del esqueleto granular y su reacción con los diferentes elementos del hormigón, desde el punto de vista de la química de los elementos. Jugando con los aditivos de las mezclas, un mejor análisis de la reacción de estos con los finos puede suponer mejoras en el hormigón
- Variar la clase resistente del cemento y la cantidad de los finos, ya que quizás con clases menores y cantidades similares de finos, se consiguen mejoras no solo en el coste económico y medioambiental sino también en lo que a resistencia a compresión se refiere
- Si bien la tesina se ha centrado en las propiedades del hormigón endurecido, un mejor estudio de las propiedades del hormigón fresco permitirían obtener conclusiones sobre que parámetros cambiar para obtener mejores resultados en el hormigón endurecido

CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFIA

Acker, P. and Ulm, F.J. 2001. Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. *Nuclear Engineering and Design* vol. 203, pp. 143 - 158. 2001.

Acker, P. 2001. Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms. *Proceedins of the Sitxth International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials (Concreep6)*. Cambridge, E.E.U.U. pp - 15 - 26 : s.n., 2001.

Bertrand, René. 1987. *Influence des fillers calcaires sur la maniabilité des bétons*. Artículo. 1987.

—. **1968.** *Les granulats calcaires dans les mortiers et bétons*. Artículo. 1968.

Bizzoto, Marcela B., Astori, Raúl E. and Sanguinetti, Bibbiana M. 2006. *Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con hormigones de la región de NEA*. Universidad Nacional del Nordeste. Chaco, Argentina : s.n., 2006.

Canavos, George C. 1998. *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos*. s.l. : Mc-GRaw Hill, 1998.

Colomer, Jose. 1974. *Retracción del hormigón e influéncia de los aditivos en la misma*. s.l. : Revista de Obras Públicas, 1974.

Delibes, Adolfo. 1987. *Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón.* España : Intemac, 1987.

Dopico, Juan J., et al. 2008. *Desarrollo de hormigones con cal-puzolan fina como material cementicio suplementario.* s.l. : Ingeniería de Construcción, 2008.

Fernández, Gabriel R. 1980. La influencia de algunas características de los áridos finos (arenas) en las propiedades del hormigón de cemento portland. *Sección hormigón preparado.* 1980.

González Martínez, Purificación. 1992. *Influencia de los finos en las Características mecánicas de los hormigones fabricados en Navarra.* s.l. : Tesis Doctoral. Departamento: Edificación. Programa de doctorado en Arquitectura., 1992.

Kumar Mehta, P. 1986. *Concrete. Structure, properties and materials.* New Jersey : Joan L. Stone, 1986.

Luaces, Cesar. 2007. *Los áridos y el cemento. El Recorrido de los minerales.* Madrid : Domènech e-Learning Multimedia, S.A., 2007.

Martín, Manuel L. 2003. *La EHE explicada por sus autores.* Español Rústica : Leynfor Siglo XXI, 2003.

Metha, P.K. and Monteiro, P.J.M. 2008. *Concreto: Microestructura, Propiedades e Materiais.* s.l. : Editora Ibracon. 674pp., 2008.

Neville, A. 1996. *Properties of concrete.* s.l. : Prentice Hall, 1996.

Oroviogicoechea, A. 1981. *El contenido en finos de las arenas para hormigones.* 1981.

Parapinski dos Santos, Ana Carolina. 2010. *Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular.* Barcelona : s.n., 2010.

Peña, Alfonso. 1923. *Compacidad y resistencia de los horigones.* s.l. : Revista de Obras Públicas. Tomo 1, 1923.

Ramirez, J. L., Barcena, J. M. and Urreta, J. I. 1985. *Arenas calizas para la confección de hormigones: influencia de sus finos calizos y arcillosos a nivel de morteros.* 1985.

Romo Proaño, Marcelo. 2009. *Fundamentos del hormigón simple.* Escuela Politécnica del Ejército - Ecuador. 2009.

Tamtsia, B. T. and Beaoudin, J. J. 2000. Basic Creep of hardened cement paste. A reexamination of the role of water. *Cement and Concrete Research.* 2000.

Urreta, Javier I. 1986. *Estudio sobre la nocividad de corrección de los finos de las arenas calizas de machaqueo para hormigón.* Bilbao. Labein : Tesis Doctoral. E.S. Ingenieros Industriales., 1986.

Urtubey, Edgardo and Lorefice, Ricardo. 2006. *Fluencia basica del hormigón, factores que intervienen -Estado del arte y modelos de predicción en el rango no lineal.* Buenos Aires : s.n., 2006.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS:

www.construmatica.com/construpedia

www.wikipedia.com

NORMATIVAS UTILIZADAS:

-Instrucción Española del hormigón estructural 2008. EHE-08. Ministerio de Fomento.

-Asociación española de Normalización y Certificación:

UNE-EN 933-1-2000. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

UNE-EN 933-8-2000. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8. Evaluación de los finos. Equivalente de Arena.

UNE-EN 933-9-1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9. Evaluación de los finos. Azul de Metileno.

UNE-EN 12350-2-2006. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2. Ensayo de asentamiento.

UNE-EN 12620-2002. Áridos para hormigón.

UNE-EN 7050-1997. Tamices y tamizado de ensayo

UNE-EN 7133-1958. Determinación de terrones de arcilla.

UNE-EN 83-301-1991. Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas.

UNE 83-303-1984. Ensayos de hormigón. Método de refrentado.

UNE-EN 83-304-1984. Ensayos de hormigón. Resistencia a compresión.

UNE-EN 83-306-1985. Ensayos de hormigón. Resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño)

UNE-EN 83-312-1990. Ensayos de hormigón. Determinación de la densidad del hormigón.

UNE 83-316-1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión

UNE 83-318-1994. Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud.

UNE-EN 12390-3-2003. Ensayos de hormigón. Resistencia a compresión

UNE-EN 12390-6-2001. Ensayos hormigón endurecido. Parte 6. Resistencia a tracción indirecta de probetas.

UNE-EN 12390-8-2001. Ensayos hormigón endurecido. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión

American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM)

ASTC – C512 Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression

Anejo A

En el presente Anejo se muestran las fichas de los áridos utilizados durante la campaña experimental.



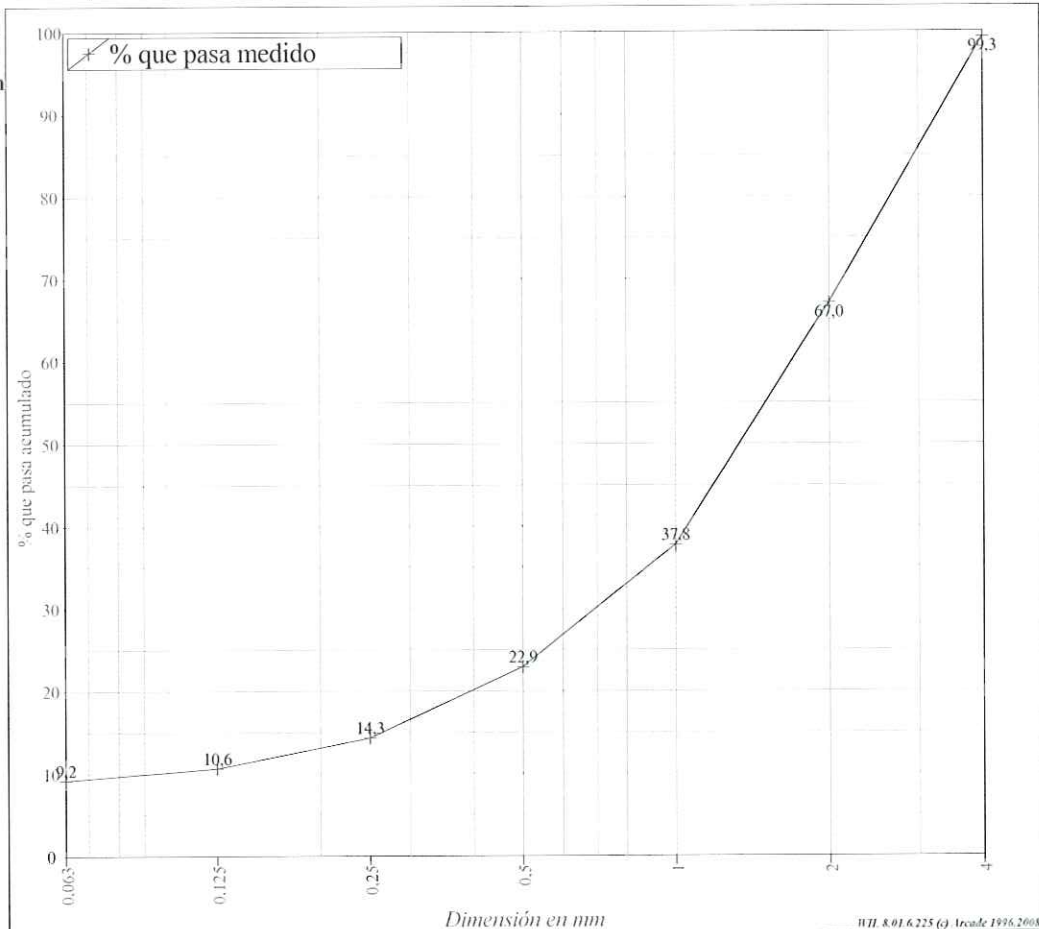
Productor : PALLEJÀ
Áridos : AF-T-0/4-C
Petrografía : Caliza

Cliente : EHE

Muestra nº 5-B0043012	837 g sacados el 11/02/2010 a 9:00
Clase de áridos	
Origen	Acopio Áridos
Modo	Conforme
Zona	Barcelona y otros
Destinación	LABORATORIO PROMSA
Hecho por	laborantes
Referencia	Referencia estándar
Observaciones internas	
Observaciones	

Composición teórica	Procedencia		Caracterís.	Cantidad
ENSAYOS	Mínimo	Valor	Máximo	Norma
Contenido en finos (según EHE)		9,20 %		UNE-EN 933-1
Módulo de Finura		3,5		UNE 146301
Equivalente de Arena (según EHE)		74		UNE-EN 933-8
Vista 1 (finos)		116,00		
Pistón 1 (arena)		86,00		
Equivalente arena 1		74,14		
Vista 2 (finos)		118,00		
Pistón 2 (arena)		88,00		
Equivalente arena 2		74,58		
Humedad		0,5 %		EN 1097-5

Análisis granulométrico				
Masa	M. Húmeda	841 g	Resto	837 g
Tamiz	mín	% que pa	máx	P.ret.acum
4.000		99,28		6,0 g
2.000		67,03		276,0 g
1.000		37,75		521,0 g
0.500		22,94		645,0 g
0.250		14,34		717,0 g
0.125		10,63		748,0 g
0.063		9,20		760,0 g



Esther FERNÁNDEZ (Técnico Áridos)

Jordi ALTET (Jefe de Laboratorio)

Domènec MASÓ (Director de Calidad)

Productor : PALLEJÀ
Áridos : AF-T-0/4-C
Petrografía : Caliza

Cliente : EHE

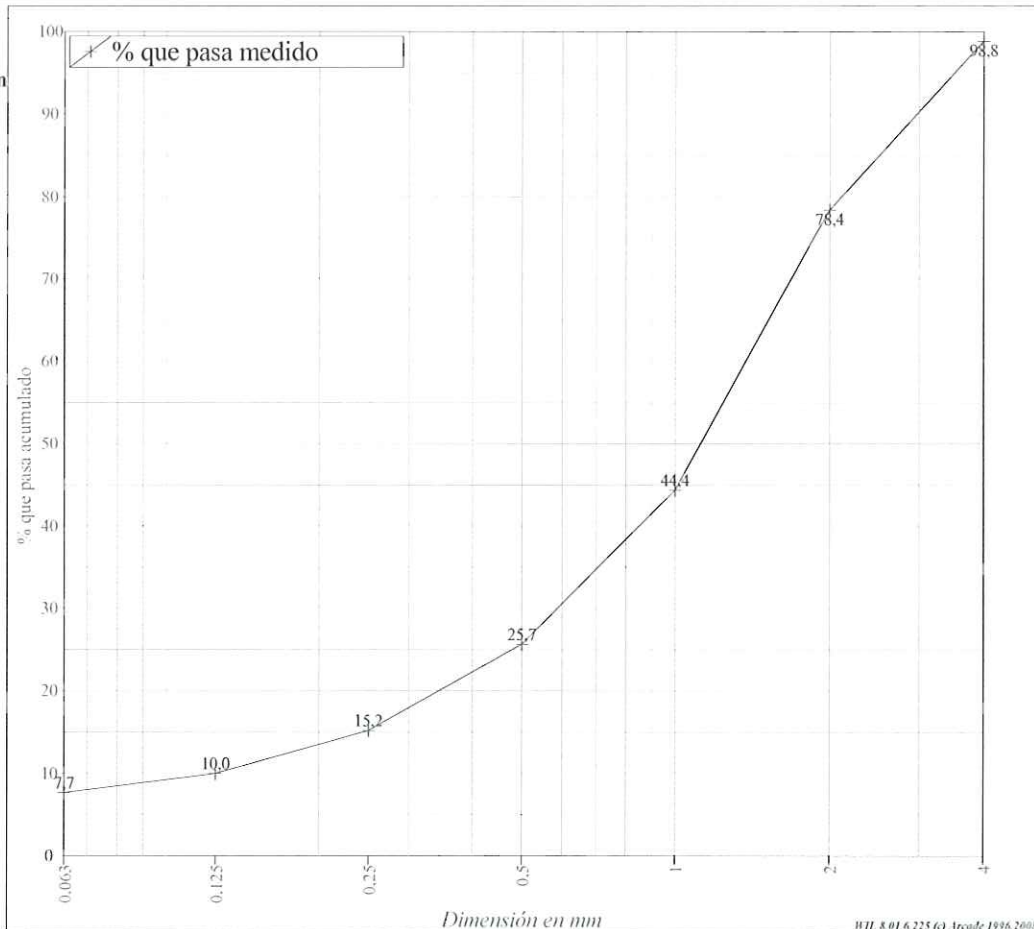
Muestra nº 5-B0053008	861 g sacados el 17/02/2010
Clase de áridos	
Origen	Acopio Áridos
Modo	Conforme
Zona	Barcelona y otros
Destinación	LABORATORIO PROMSA
Hecho por	laborantes
Referencia	Referencia estándar
Observaciones internas	
Observaciones	

Composición teórica	Procedencia	Caracterís.	Cantidad
---------------------	-------------	-------------	----------

ENSAYOS	Mínimo	Valor	Máximo	Norma
Contenido en finos (según EHE)		7,67 %		UNE-EN 933-1
Módulo de Finura		3,3		UNE 146301
Equivalente de Arena (según EHE)		72		UNE-EN 933-8
Vista 1 (finos)		128,00		
Pistón 1 (arena)		93,00		
Equivalente arena 1		72,66		
Vista 2 (finos)		126,00		
Pistón 2 (arena)		91,00		
Equivalente arena 2		72,22		

Humedad		0,3 %	EN 1097-5
---------	--	-------	-----------

Análisis granulométrico				
Masa	M. Húmeda	864 g	Resto	861 g
Tamiz	mín	% que pa	máx	P.ret.acum
4.000		98,84		10,0 g
2.000		78,40		186,0 g
1.000		44,37		479,0 g
0.500		25,67		640,0 g
0.250		15,21		730,0 g
0.125		9,99		775,0 g
0.063		7,67		795,0 g



WH. 8.01.6.225 (c). Arcade 1996, 2008

Esther FERNÁNDEZ (Técnico Áridos)

Jordi ALTET (Jefe de Laboratorio)

Domènec MASÓ (Director de Calidad)



PROMSA

LABORATORIO PROMSA

Ctra. N-340 Km 1242,3 Aptdo. n° 32 Sant Vicenç dels Horts
08620 BARCELONA

Informe de ensayos

Fecha : 25/01/2010

Página 1/1, imprimido el lunes, 02 de agosto de 2010

Productor : **PALLEJÀ**
Áridos : **Garbancillo 4/10**
Petrografía : **Caliza**

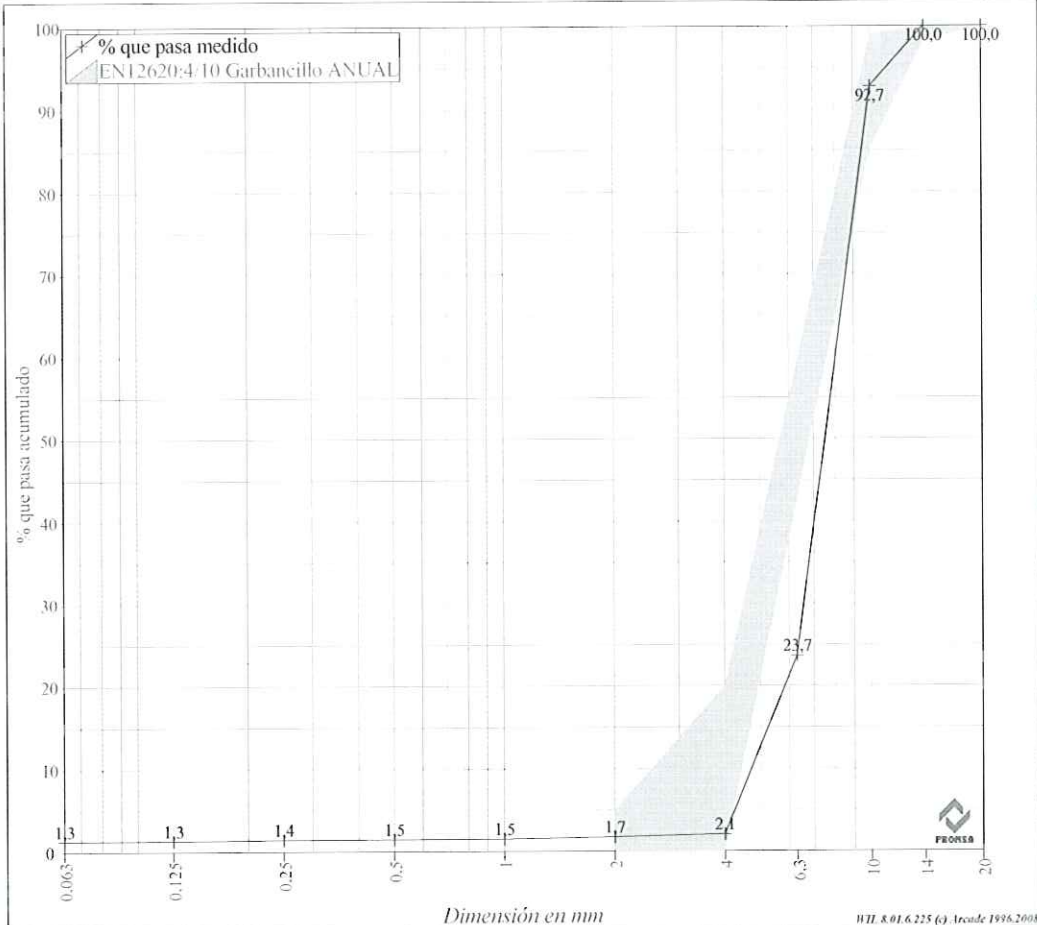
Cliente : **AUTOCONTROL**

Muestra nº 5-B0039022	1901 g sacados el 25/01/2010
Clase de áridos	4/10 mm
Origen	Silo
Modo	Conforme
Zona	Barcelona y otros
Destinación	LABORATORIO PROMSA
Hecho por	laborantes
Referencia	EN 12620 Áridos para Hormigón : 4/10 Garbancillo ANUAL
Observaciones internas	
Observaciones	

ENSAYOS	Mínimo	Valor	Máximo	Norma
Índice de Lajas		5,00		EN 933-3
Módulo granulométrico		5,98		
Caras de fractura (D<2d)	Totalmente triturada (100,00 %)			EN 933-5
% partículas trituradas				
% partículas redondeadas				
% partículas totalmente redondeadas				
Comprobación de la Granulometría		0,43 %	1,00	EN 933-1
Humedad		0,9 %		EN 1097-5
Contenido en finos		1,3 %		UNE-EN 933-1
Masa que queda en el fondo de la bandeja		4,00 g		
Masa seca retenida en 0,063 tras lavado		1880,00 g		

Análisis granulométrico

Masa	M. Húmeda	1919 g	Resto	1901 g
Tamiz	mín	% que pasa	máx	P.ret.acum.
20.000	100	100	100	0,0 g
14.000	98	100	100	0,0 g
10.000	85	93	99	138,0 g
6.300		24		1451,0 g
4.000	0	2	20	1862,0 g
2.000	0	2	5	1868,0 g
1.000		2		1872,0 g
0.500		1		1873,0 g
0.250		1		1874,0 g
0.125		1		1876,0 g
0.063		1,3		1876,0 g



Esther FERNÁNDEZ (Técnico Áridos)

Jordi ALTET (Jefe de Laboratorio)

Domènec MASÓ (Director de Calidad)

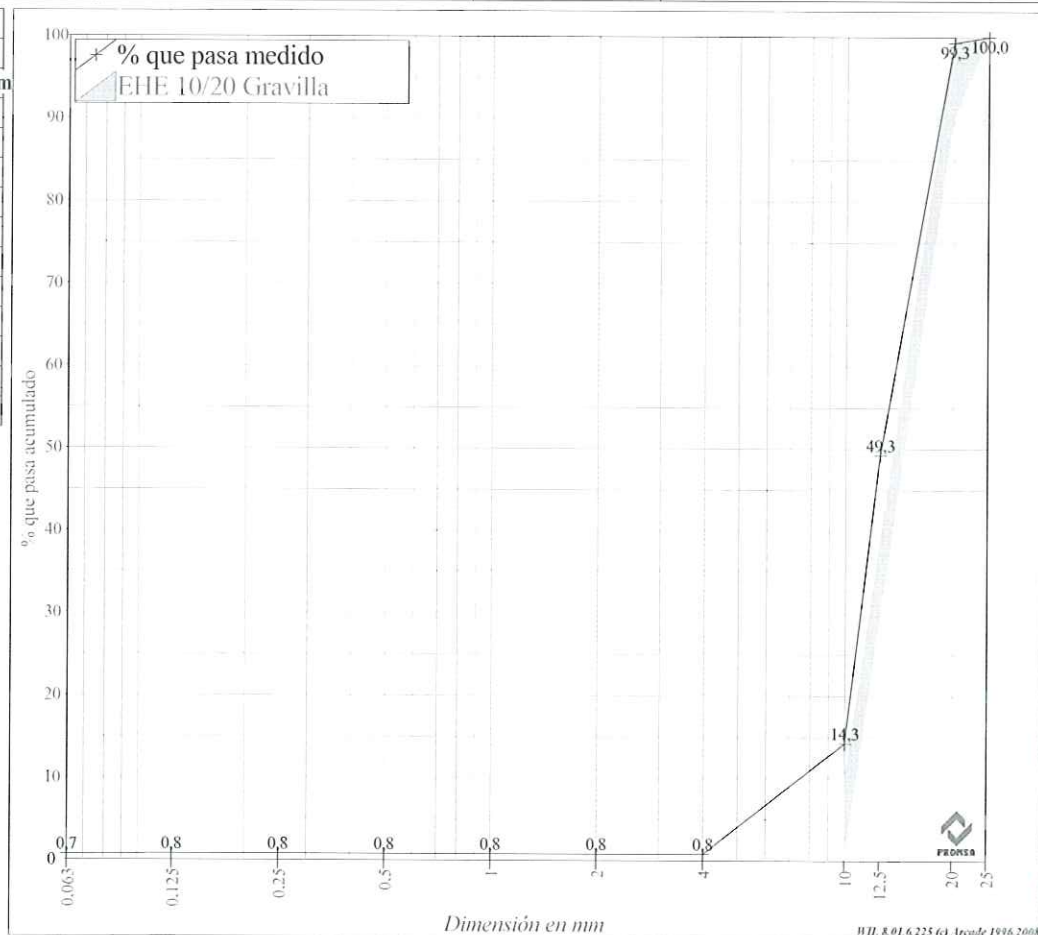
Productor : PALLEJÀ
Áridos : Gravilla 10/20
Petrografía : Caliza

Cliente : EHE

Muestra nº 5-B0042001	1415 g sacados el 04/02/2010
Clase de áridos	10/20 mm
Origen	Acopio Áridos
Modo	Conforme
Zona	Barcelona y otros
Destinación	PALLEJÀ (Áridos)
Hecho por	laborantes
Referencia	EHE 10/20 Gravilla
Observaciones internas	
Observaciones	

ENSAYOS	Mínimo	Valor	Máximo	Norma
Índice de limpieza		0,8 %	2,0	UNE 146130:2000
Contenido en finos (según EHE)		0,71 %	2,00	UNE-EN 933-1
Módulo granulométrico		6,82		
Humedad		0,5 %		EN 1097-5

Análisis granulométrico				
Masa	M. Húmeda 1422 g	Resto	1415 g	
Tamiz	mín	% que pa	máx	P.ret.acum
25.000	100,00	100,00	100,00	0,0 g
20.000	90,00	99,29	100,00	10,0 g
12.500		49,26		718,0 g
10.000	0,00	14,28	10,00	1213,0 g
4.000		0,78		1404,0 g
2.000		0,78		1404,0 g
1.000		0,78		1404,0 g
0.500		0,78		1404,0 g
0.250		0,78		1404,0 g
0.125		0,78		1404,0 g
0.063		0,71		1405,0 g



Esther FERNÁNDEZ (Técnico Áridos)

Jordi ALTET (Jefe de Laboratorio)

Domènec MASÓ (Director de Calidad)

Anejo B

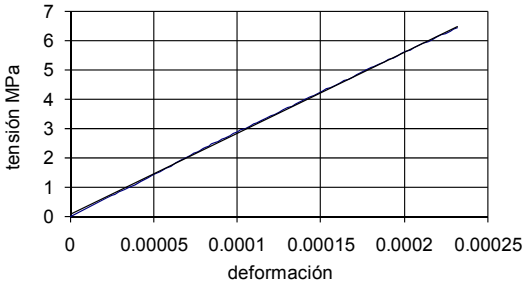
En el Presente Anejo se muestran las fichas con los resultados parciales de los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo elástico realizados en el LTE. La nomenclatura utilizada difiere del resto del documento, así H1 pertenece a la dosificación PT y H2 a FL.

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 23/02/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 1/2

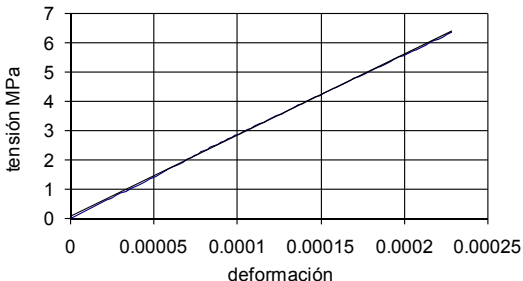
Datos de la probeta		
Procedencia		Escofet
Identificación		H1
		Hormigón con finos (175 Kg/m³)
Fecha de fabricación		11/02/2010
Fecha recepción al LTE		16/02/2010
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%
Número de muestra		1 de 2
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo		18 de febrero de 2010
Edad probeta		7 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/5
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		5,3 kN/seg
Extensómetro		3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %
Rango ciclo		0,5 MPa – 6,5 MPa
Rango para cálculo E		0,6 Mpa – 6,4 MPa
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo		18 de febrero de 2010
Edad probeta		7 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/1
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		8,8 kN/seg

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H1	
Resultados:	
Muestra	H1-E7-1
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	27.728
	27.747
E probeta (MPa)	27.736
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	384,6
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	21,76

Probeta 1 / 2ciclo $y = 27728x + 0.063$
 $R^2 = 0.9997$



Probeta 1 / 3ciclo $y = 27747x + 0.0574$
 $R^2 = 0.9997$

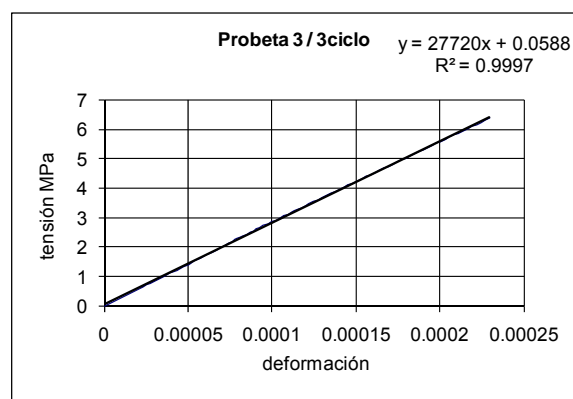
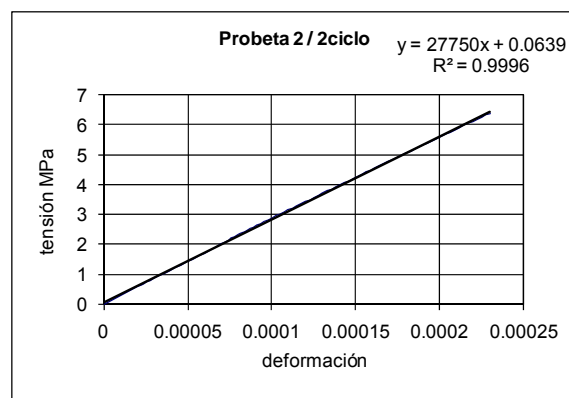




 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)	
Fecha: 23/02/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 2/2

Datos de la probeta		Muestra de ensayo:	
Procedencia	Escofet	Hormigón con finos H1	
Identificación	H1		
	Hormigón con finos (175 Kg/m ³)		
Fecha de fabricación	11/02/2010		
Fecha recepción al LTE	16/02/2010		
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%		
Número de muestra	2 de 2		
Dimensiones probeta (mm)	Ø 150 H 300		
Variables de ensayo módulo			
Fecha de ensayo	18 de febrero de 2010		
Edad probeta	7 días		
Operador	Camilo Bernad		
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000		
Escala	1/5		
Control ensayo	Fuerza		
Velocidad	5,3 kN/seg		
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %		
Rango ciclo	0,5 MPa – 6,5 MPa		
Rango para cálculo E	0,6 Mpa – 6,4 MPa		
Variables de ensayo compresión			
Fecha de ensayo	18 de febrero de 2010		
Edad probeta	7 días		
Operador	Camilo Bernad		
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000		
Escala	1/1		
Control ensayo	Fuerza		
Velocidad	8,8 kN/seg		

Resultados:

Muestra	H1-E7-2
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	27.750
	27.720
E probeta (MPa)	27.735
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	379,1
A (mm ²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	21,46



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación de la resistencia a compresión de probetas (UNE-EN 12390-3)	
Fecha: 12/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/1

			<div>Muestra de ensayo:</div> <div>Hormigón con finos H1</div>			

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 12/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 1/3

Datos de la probeta		
Procedencia		Escofet
Identificación		H1
Material		Hormigón con finos (175 Kg/m³)
Fecha de fabricación		11/02/2010
Fecha recepción al LTE		16/02/2010
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%
Número de muestra		1 de 3
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo		11 de marzo de 2010
Edad probeta		28 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/5
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		5 kN/seg
Extensómetro		3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %
Rango ciclo		0,5 MPa – 9 Mpa
Rango para cálculo E		0,6 Mpa – 9 Mpa
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo		11 de marzo de 2010
Edad probeta		28 días
Operador		Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/1
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		8,8 kN/seg

Muestra de ensayo:

Hormigón con finos H1

Muestra	H1-E28-1
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (Mpa)	30.895
	30.903
E probeta (Mpa)	30.899
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	530,1
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (Mpa)	30,00

Probeta 1 / 2ciclo

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

tensión MPa

0

0.0001

0.0002

0.0003

deformación

$y = 30883x + 0.0935$

$R^2 = 0.9998$

Probeta 1 / 3ciclo

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

tensión MPa

0

0.0001

0.0002

0.0003

deformación

$y = 30903x + 0.0856$

$R^2 = 0.9998$

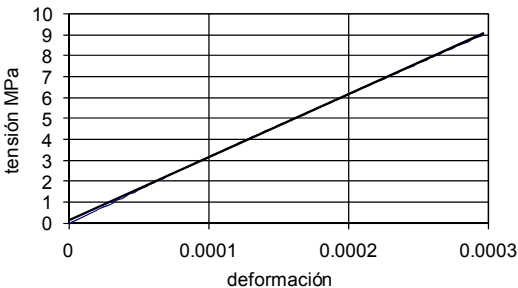
 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 12/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 2/3

Datos de la probeta		
Procedencia	Escofet	
Identificación	H1	
	Hormigón con finos (175 Kg/m³)	
Fecha de fabricación	11/02/2010	
Fecha recepción al LTE	16/02/2010	
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	
Número de muestra	2 de 3	
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo	11 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/5	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	5 kN/seg	
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %	
Rango ciclo	0,5 Mpa – 9 Mpa	
Rango para cálculo E	0,6 Mpa – 9 Mpa	
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo	11 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/1	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	8,8 kN/seg	

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H1	
Resultados:	
Muestra	H1-E28-2
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	30.288
	30.217
E probeta (MPa)	30.256
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	485,6
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	27,48

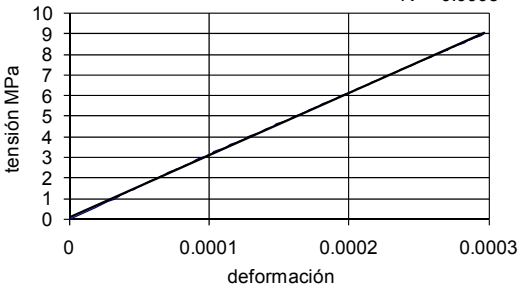
Probeta 2 / 2ciclo

$y = 30288x + 0.103$
 $R^2 = 0.9998$



Probeta 3 / 3ciclo

$y = 30217x + 0.0915$
 $R^2 = 0.9998$



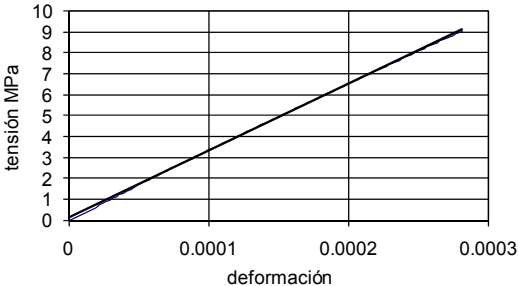
 <div>Laboratori de Tecnologia d'Estructures</div>	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 12/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 3/3

Datos de la probeta		
Procedencia	Escofet	
Identificación	H1	
	Hormigón con finos (175 Kg/m³)	
Fecha de fabricación	11/02/2010	
Fecha recepción al LTE	16/02/2010	
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	
Número de muestra	3 de 3	
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo	11 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/5	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	5 kN/seg	
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %	
Rango ciclo	0,5 MPa – 9 MPa	
Rango para cálculo E	0,6 MPa – 9 MPa	
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo	11 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/1	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	8,8 kN/seg	

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H1	
Resultados:	
Muestra	H1-E28-3
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	32.088
	32.074
E probeta (MPa)	32.081
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	505,2
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	28,59

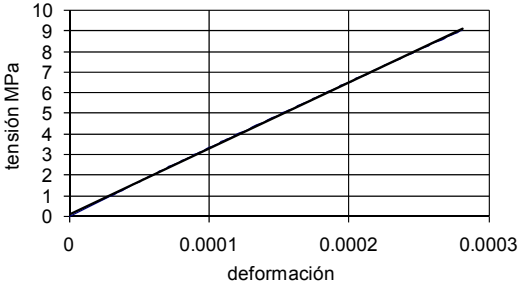
Probeta 2 / 2ciclo



$y = 32088x + 0.1055$
 $R^2 = 0.9997$



Probeta 3 / 3ciclo

$y = 32074x + 0.0907$
 $R^2 = 0.9998$

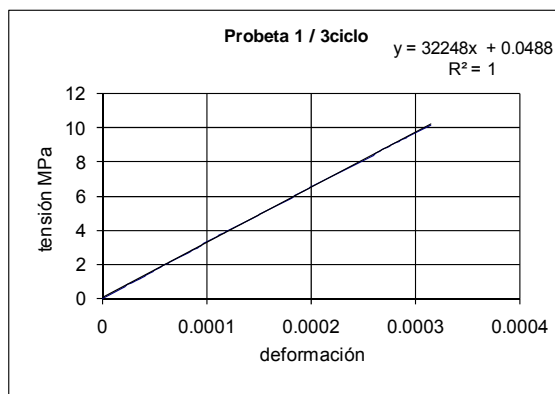
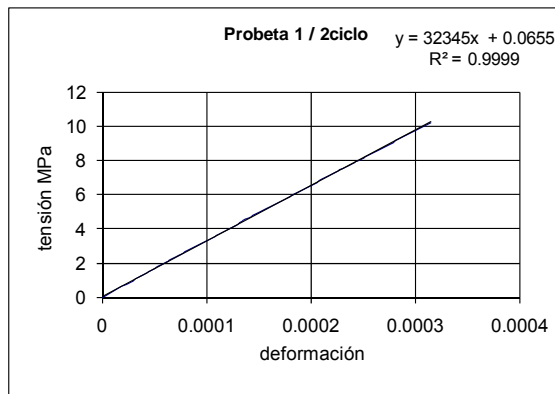


 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6)	
Fecha: 12/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/1

			<div>Muestra de ensayo:</div> <div>Hormigón con finos H1</div>			

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)	
Fecha: 17/05//2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/2

Datos de la probeta		Muestra de ensayo:	
Procedencia	Escofet	Hormigón con finos H1	
Identificación	H1	Resultados:	
	Hormigón con finos (175 Kg/m ³)		
Fecha de fabricación	11/02/2010	Muestra	H1-E90-1
Fecha recepción al LTE	16/02/2010	Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	Módulo de deformación longitudinal	
Número de muestra	1 de 2	E ciclo2/3 (MPa)	32.345
Dimensiones probeta (mm)	Ø 150		32.248
	H 300	E probeta (MPa)	32.297
Variables de ensayo módulo		Rotura a compresión	
Fecha de ensayo	12 de mayo de 2010	Fuerza max (kN)	523,9
Edad probeta	90 días	A (mm ²)	17671,46
Operador	Camilo Bernad	f _c probeta (MPa)	29,65
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000		
Escala	1/5		
Control ensayo	Fuerza		
Velocidad	5 kN/seg		
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %		
Rango ciclo	0,5 MPa – 10,3 MPa		
Rango para cálculo E	0,6 MPa – 10,2 MPa		
Variables de ensayo compresión			
Fecha de ensayo	14 de mayo de 2010		
Edad probeta	92 días		
Operador	Camilo Bernad		
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000		
Escala	1/1		
Control ensayo	Fuerza		
Velocidad	8,8 kN/seg		



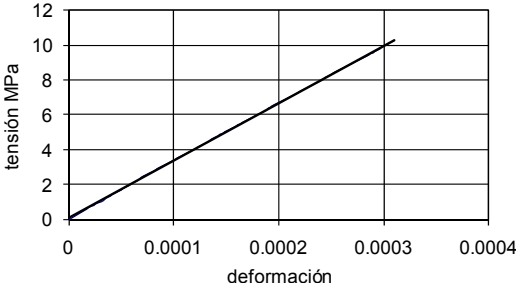
 <div>Laboratori de Tecnologia d'Estructures</div>	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 17/05//2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 2/2

Datos de la probeta		
Procedencia		Escofet
Identificación		H1
		Hormigón con finos (175 Kg/m³)
Fecha de fabricación		11/02/2010
Fecha recepción al LTE		16/02/2010
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%
Número de muestra		2 de 2
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo		12 de mayo de 2010
Edad probeta		90 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/5
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		5 kN/seg
Extensómetro		3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %
Rango ciclo		0,5 MPa – 10,3 MPa
Rango para cálculo E		0,6 MPa – 10,2 MPa
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo		14 de mayo de 2010
Edad probeta		92 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/1
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		8,8 kN/seg

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H1	
Resultados:	
Muestra	H1-E90-2
Método ajuste	Pulido
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	32.915
	32.809
E probeta (MPa)	32.579
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	570,0
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	32,26

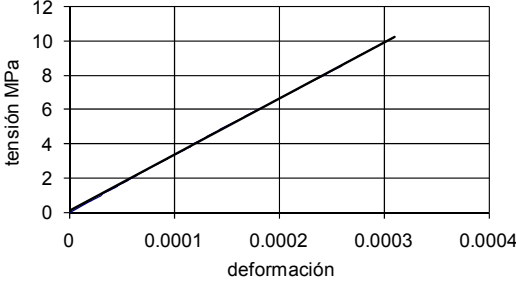
Probeta 2 / 2ciclo

$y = 32915x + 0.0855$
 $R^2 = 0.9999$



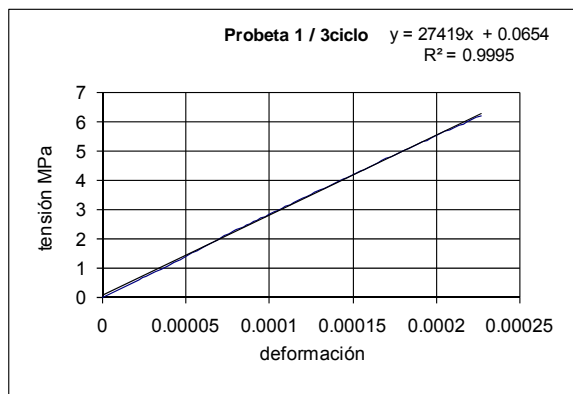
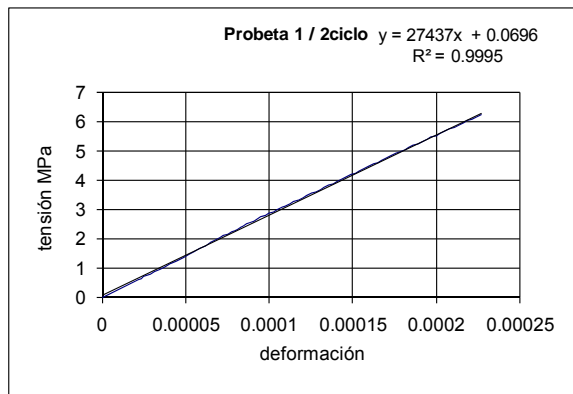
Probeta 3 / 3ciclo

$y = 32809x + 0.0683$
 $R^2 = 0.9999$



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)	
Fecha: 10/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/2

Datos de la probeta		Muestra de ensayo:	
Procedencia	Escofet	Hormigón con finos H2	
Identificación	H2	Resultados:	
	Hormigón con finos (275 Kg/m ³)		
Fecha de fabricación	18/02/2010	Muestra	H2-E7-1
Fecha recepción al LTE	23/02/2010	Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	Módulo de deformación longitudinal	
Número de muestra	1 de 2	E ciclo2/3 (MPa)	27.437
Dimensiones probeta (mm)	Ø 150		27.419
	H 300	E probeta (MPa)	27.428
Variables de ensayo módulo		Rotura a compresión	
Fecha de ensayo	25 de febrero de 2010	Fuerza max (kN)	356,1
Edad probeta	7 días	A (mm ²)	17671,46
Operador	Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon	f _c probeta (MPa)	20,15
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000		
Escala	1/5		
Control ensayo	Fuerza		
Velocidad	5,3 kN/seg		
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %		
Rango ciclo	0,5 MPa – 6,5 MPa		
Rango para cálculo E	0,6 Mpa – 6,4 MPa		
Variables de ensayo compresión			
Fecha de ensayo	25 de febrero de 2010		
Edad probeta	7 días		
Operador	Robert M. Mc-Aloon		
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000		
Escala	1/1		
Control ensayo	Fuerza		
Velocidad	8,8 kN/seg		



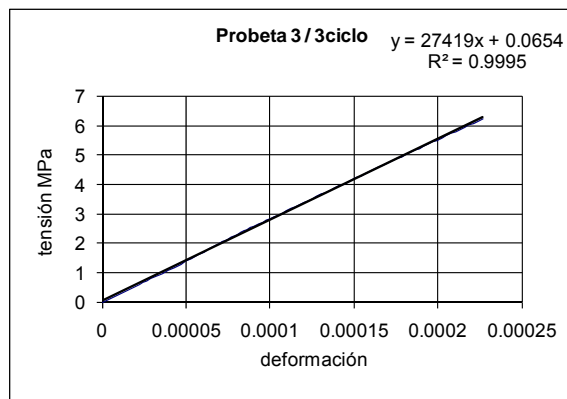
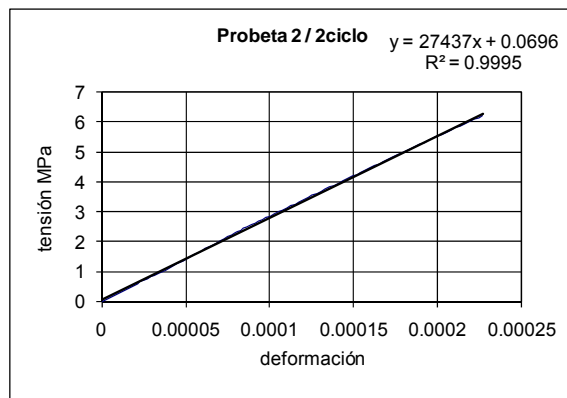
 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 10/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 2/2



Datos de la probeta		
Procedencia	Escofet	
Identificación	H2	
	Hormigón con finos (275 Kg/m³)	
Fecha de fabricación	18/02/2010	
Fecha recepción al LTE	23/02/2010	
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	
Número de muestra	2 de 2	
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo	25 de febrero de 2010	
Edad probeta	7 días	
Operador	Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/5	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	5,3 kN/seg	
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %	
Rango ciclo	0,5 MPa – 6,5 MPa	
Rango para cálculo E	0,6 Mpa – 6,4 MPa	
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo	25 de febrero de 2010	
Edad probeta	7 días	
Operador	Robert M. Mc-Aloon	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/1	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	8,8 kN/seg	

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H2	
Resultados:	
Muestra	H2-E7-2
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	27.437
	27.419
E probeta (MPa)	27.728
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	344,9
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	19,52

Probeta 2 / 2ciclo $y = 27437x + 0.0696$
 $R^2 = 0.9995$

Probeta 3 / 3ciclo $y = 27419x + 0.0654$
 $R^2 = 0.9995$



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación de la resistencia a compresión de probetas (UNE-EN 12390-3)	
Fecha: 23/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/1

			<div>Muestra de ensayo:</div> <div>Hormigón con finos H2</div>			
</						

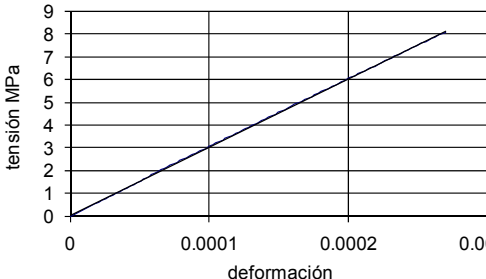
 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)	
Fecha: 23/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/3

Datos de la probeta		
Procedencia		Escofet
Identificación		H2
		Hormigón con finos (275 Kg/m³)
Fecha de fabricación		18/02/2010
Fecha recepción al LTE		23/02/2010
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%
Número de muestra		1 de 3
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo		18 de marzo de 2010
Edad probeta		28 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/5
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		5 kN/seg
Extensómetro		3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %
Rango ciclo		0,5 MPa – 8,1 MPa
Rango para cálculo E		0,52 MPa – 8 MPa
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo		11 de marzo de 2010
Edad probeta		28 días
Operador		Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/1
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		8,8 kN/seg

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H1	
Resultados:	
Muestra	H2-E28-1
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	29.939
	29.880
E probeta (MPa)	29.910
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	439,1
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	24,85

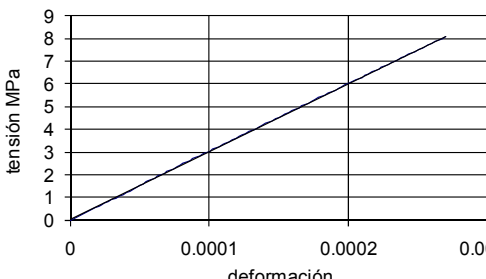
Probeta 1 / 2ciclo

$y = 29939x + 0.0505$
 $R^2 = 0.9999$



Probeta 1 / 3ciclo

$y = 29880x + 0.0449$
 $R^2 = 0.9999$



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 23/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 2/3

Datos de la probeta		
Procedencia	Escofet	
Identificación	H2	
	Hormigón con finos (275 Kg/m³)	
Fecha de fabricación	18/02/2010	
Fecha recepción al LTE	23/02/2010	
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	
Número de muestra	2 de 3	
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo	18 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/5	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	5 kN/seg	
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %	
Rango ciclo	0,5 MPa – 8,1 MPa	
Rango para cálculo E	0,52 MPa – 8 MPa	
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo	18 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/1	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	8,8 kN/seg	

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H2	
Resultados:	
Muestra	H2-E28-2
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	29.502
	29.481
E probeta (MPa)	29.492
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	448,7
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	25,39

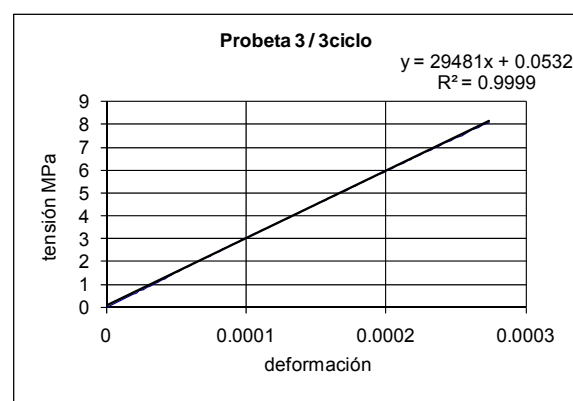
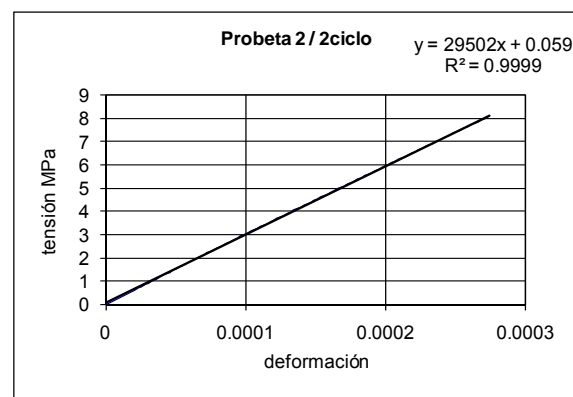
Probeta 2 / 2ciclo

$y = 29502x + 0.059$
 $R^2 = 0.9999$

Probeta 3 / 3ciclo

$y = 29481x + 0.0532$
 $R^2 = 0.9999$

Muestra	H2-E28-2
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	29.502
	29.481
E probeta (MPa)	29.492
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	448,7
A (mm ²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	25,39



 <div>Laboratori de Tecnologia d'Estructures</div>	FICHA DE ENSAYO		
	Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83316:1996)		
Fecha: 23/03/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 3/3

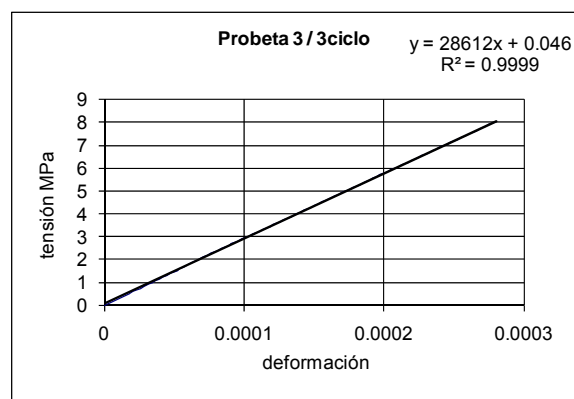
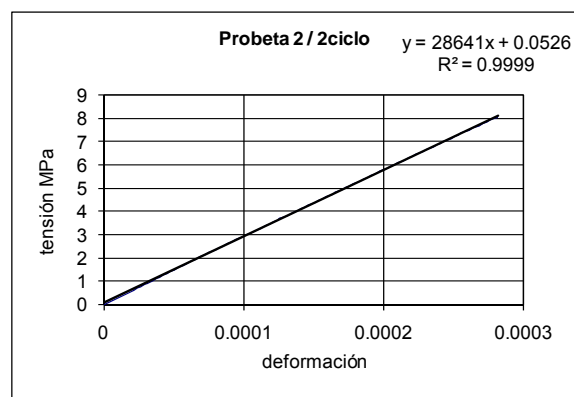
Datos de la probeta		
Procedencia	Escofet	
Identificación	H2	
	Hormigón con finos (275 Kg/m³)	
Fecha de fabricación	18/02/2010	
Fecha recepción al LTE	23/02/2010	
Conservación probeta	Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%	
Número de muestra	3 de 3	
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo	18 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/5	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	5 kN/seg	
Extensómetro	3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %	
Rango ciclo	0,5 MPa – 8,1 MPa	
Rango para cálculo E	0,52 MPa – 8 MPa	
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo	18 de marzo de 2010	
Edad probeta	28 días	
Operador	Camilo Bernad Robert M. Mc-Aloon	
Máquina de ensayo	Ibertest MEH 3000	
Escala	1/1	
Control ensayo	Fuerza	
Velocidad	8,8 kN/seg	



Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H2	
Resultados:	
Muestra	H2-E28-3
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	28.641
	28.612
E probeta (MPa)	28.627
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	422,0
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	23,88

Probeta 2 / 2ciclo $y = 28641x + 0.0526$
 $R^2 = 0.9999$



Probeta 3 / 3ciclo $y = 28612x + 0.046$
 $R^2 = 0.9999$

Muestra	H2-E28-3
Método ajuste	Refrentado con mortero de azufre
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	28.641
	28.612
E probeta (MPa)	28.627
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	422,0
A (mm ²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	23,88



 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Determinación de la resistencia a compresión de probetas (UNE-EN 12390-3)	
Fecha: 20/05/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 1/1

			<div>Muestra de ensayo:</div> <div>Hormigón con finos H2</div>																																																																																		
			<div>Resultados:</div>																																																																																		
<table><tr><th colspan="3">Datos de las probetas</th></tr><tr><td colspan="2">Procedencia</td><td>Escofet</td></tr><tr><td colspan="2">Identificación</td><td>H2</td></tr><tr><td colspan="2">Material</td><td>Hormigón con finos (275 Kg/m³)</td></tr><tr><td colspan="2">Fecha de fabricación</td><td>18/02/2010</td></tr><tr><td colspan="2">Fecha recepción al LTE</td><td>23/02/2010</td></tr><tr><td colspan="2">Conservación probeta</td><td>Cámara húmeda 20±2 °C HR≥95%</td></tr><tr><td colspan="2">Número de muestras</td><td>2</td></tr><tr><td rowspan="2">Dimensiones probeta (mm)</td><td>Ø</td><td>150</td></tr><tr><td>H</td><td>300</td></tr><tr><th colspan="3">Variables de ensayo</th></tr><tr><td colspan="2">Fecha de ensayo</td><td>19 de mayo de 2010</td></tr><tr><td colspan="2">Edad probeta</td><td>90 días</td></tr><tr><td colspan="2">Operador</td><td>Camilo Bernad</td></tr><tr><td colspan="2">Máquina de ensayo</td><td>Ibertest MEH 3000</td></tr><tr><td colspan="2">Escala</td><td>1/1</td></tr><tr><td colspan="2">Control ensayo</td><td>Fuerza</td></tr><tr><td colspan="2">Velocidad</td><td>8,8 kN/seg</td></tr><tr><td colspan="2">Observaciones</td><td></td></tr></table>			Datos de las probetas			Procedencia		Escofet	Identificación		H2	Material		Hormigón con finos (275 Kg/m³)	Fecha de fabricación		18/02/2010	Fecha recepción al LTE		23/02/2010	Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR≥95%	Número de muestras		2	Dimensiones probeta (mm)	Ø	150	H	300	Variables de ensayo			Fecha de ensayo		19 de mayo de 2010	Edad probeta		90 días	Operador		Camilo Bernad	Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000	Escala		1/1	Control ensayo		Fuerza	Velocidad		8,8 kN/seg	Observaciones			<table><tr><th>Muestra</th><th>C1</th><th>C2</th></tr><tr><td>Método ajuste</td><td>Pulido</td><td>Pulido</td></tr><tr><td>Lugar ajuste</td><td>LTE</td><td>LTE</td></tr><tr><td>Fuerza max (kN)</td><td>455,3</td><td>479,4</td></tr><tr><td>A (mm²)</td><td>17671,46</td><td>17671,46</td></tr><tr><td>f_c probeta (MPa)</td><td>25,77</td><td>27,13</td></tr><tr><td>f_c media (MPa)</td><td colspan="2">26,45</td></tr><tr><td>Coef. Variación</td><td colspan="2">3,64 %</td></tr></table>			Muestra	C1	C2	Método ajuste	Pulido	Pulido	Lugar ajuste	LTE	LTE	Fuerza max (kN)	455,3	479,4	A (mm²)	17671,46	17671,46	f _c probeta (MPa)	25,77	27,13	f _c media (MPa)	26,45		Coef. Variación	3,64 %	
Datos de las probetas																																																																																					
Procedencia		Escofet																																																																																			
Identificación		H2																																																																																			
Material		Hormigón con finos (275 Kg/m³)																																																																																			
Fecha de fabricación		18/02/2010																																																																																			
Fecha recepción al LTE		23/02/2010																																																																																			
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR≥95%																																																																																			
Número de muestras		2																																																																																			
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150																																																																																			
	H	300																																																																																			
Variables de ensayo																																																																																					
Fecha de ensayo		19 de mayo de 2010																																																																																			
Edad probeta		90 días																																																																																			
Operador		Camilo Bernad																																																																																			
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000																																																																																			
Escala		1/1																																																																																			
Control ensayo		Fuerza																																																																																			
Velocidad		8,8 kN/seg																																																																																			
Observaciones																																																																																					
Muestra	C1	C2																																																																																			
Método ajuste	Pulido	Pulido																																																																																			
Lugar ajuste	LTE	LTE																																																																																			
Fuerza max (kN)	455,3	479,4																																																																																			
A (mm²)	17671,46	17671,46																																																																																			
f _c probeta (MPa)	25,77	27,13																																																																																			
f _c media (MPa)	26,45																																																																																				
Coef. Variación	3,64 %																																																																																				

 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO		
	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6)		
Fecha: 20/05/2010	Revisado por: Tomàs Garcia		Página: 1/2

Datos de la probeta		
Procedencia		Escofet
Identificación		H2
		Hormigón con finos (275 Kg/m³)
Fecha de fabricación		18/02/2010
Fecha recepción al LTE		23/02/2010
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%
Número de muestra		1 de 2
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo		20 de mayo de 2010
Edad probeta		91 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/5
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		5 kN/seg
Extensómetro		3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %
Rango ciclo		0,5 MPa – 8,6 MPa
Rango para cálculo E		0,6 MPa – 8,5 MPa
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo		20 de mayo de 2010
Edad probeta		91 días
Operador		Robert M. Mc-Aloon
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/1
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		8,8 kN/seg



Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H2	
Resultados:	
Muestra	H2-E28-1
Método ajuste	Pulido
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	31.315
	31.298
E probeta (MPa)	31.306
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	528,4
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	29,90

Probeta 1 / 2ciclo

$y = 31315x + 0.0669$
 $R^2 = 0.9999$

Probeta 1 / 3ciclo

$y = 31298x + 0.0516$
 $R^2 = 0.9999$

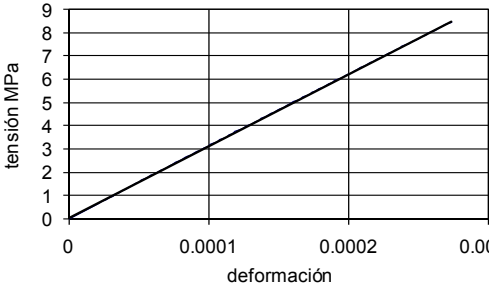
 Laboratori de Tecnologia d'Estructures	FICHA DE ENSAYO	
	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6)	
Fecha: 20/05/2010	Revisado por: Tomàs Garcia	Página: 2/2

Datos de la probeta		
Procedencia		Escofet
Identificación		H2
		Hormigón con finos (275 Kg/m³)
Fecha de fabricación		18/02/2010
Fecha recepción al LTE		23/02/2010
Conservación probeta		Cámara húmeda 20±2 °C HR>95%
Número de muestra		2 de 2
Dimensiones probeta (mm)	Ø	150
	H	300
Variables de ensayo módulo		
Fecha de ensayo		20 de mayo de 2010
Edad probeta		91 días
Operador		Camilo Bernad
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/5
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		5 kN/seg
Extensómetro		3 LVDT ± 5 mm Linealidad: 0,5 %
Rango ciclo		0,5 MPa – 8,6 MPa
Rango para cálculo E		0,6 MPa – 8,5 MPa
Variables de ensayo compresión		
Fecha de ensayo		20 de mayo de 2010
Edad probeta		91 días
Operador		Robert M. Mc-Aloon
Máquina de ensayo		Ibertest MEH 3000
Escala		1/1
Control ensayo		Fuerza
Velocidad		8,8 kN/seg

Muestra de ensayo:	
Hormigón con finos H2	
Resultados:	
Muestra	H2-E90-2
Método ajuste	Pulido
Módulo de deformación longitudinal	
E ciclo2/3 (MPa)	30.964
	30.918
E probeta (MPa)	30.941
Rotura a compresión	
Fuerza max (kN)	491,8
A (mm²)	17671,46
f _c probeta (MPa)	27,83

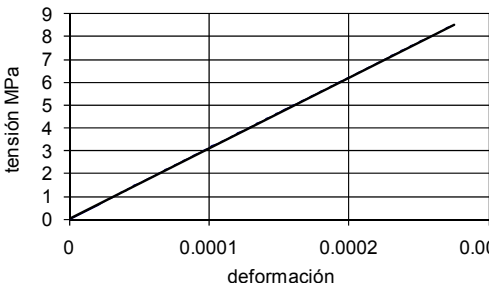
Probeta 2 / 2ciclo

$y = 30964x + 0.0351$
 $R^2 = 1$



Probeta 3 / 3ciclo

$y = 30918x + 0.0304$
 $R^2 = 1$

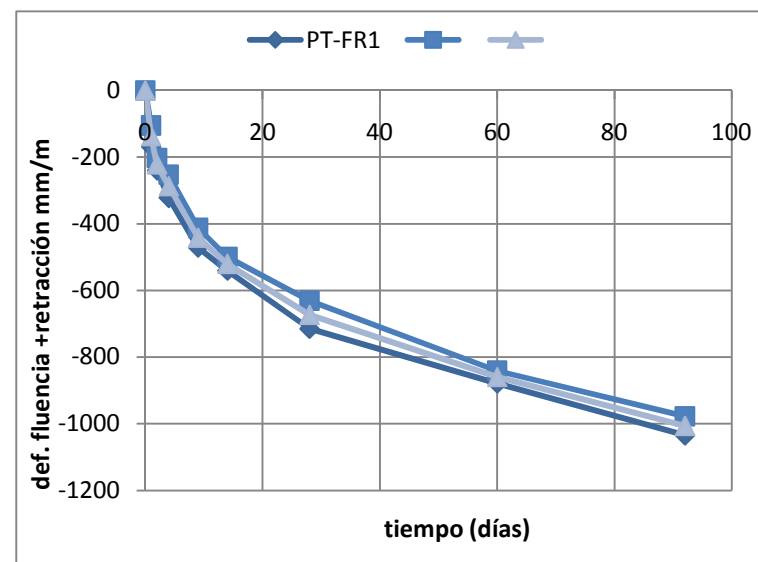
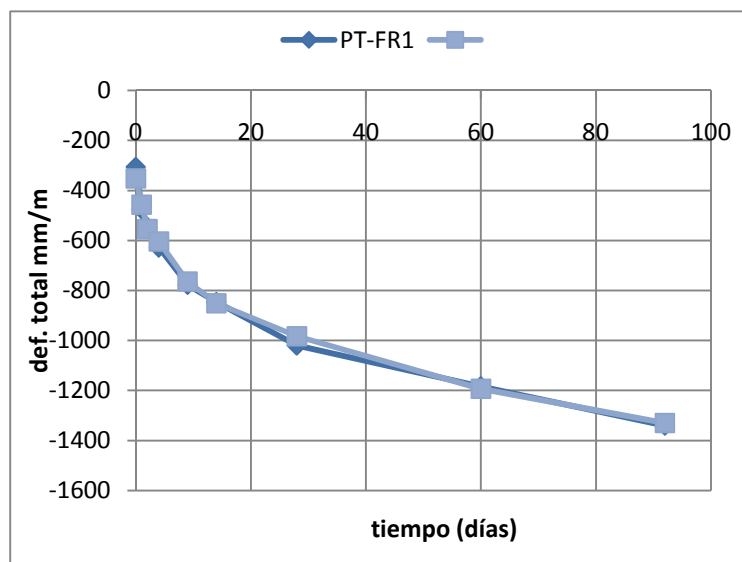
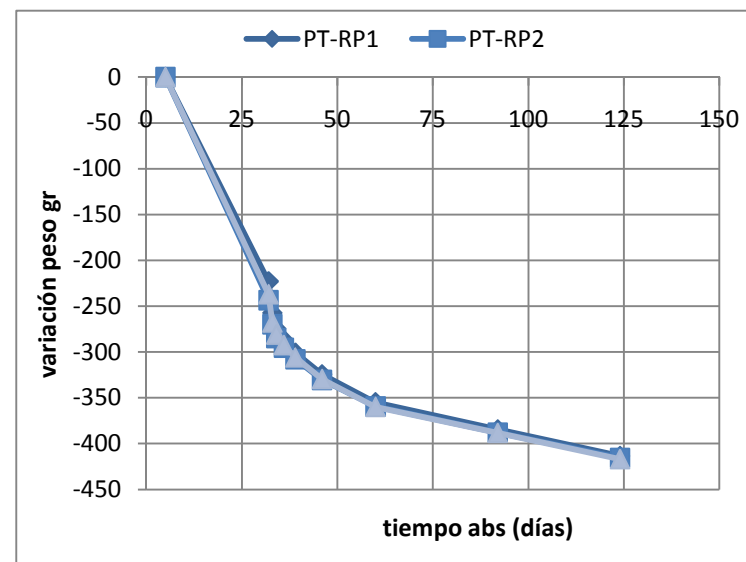
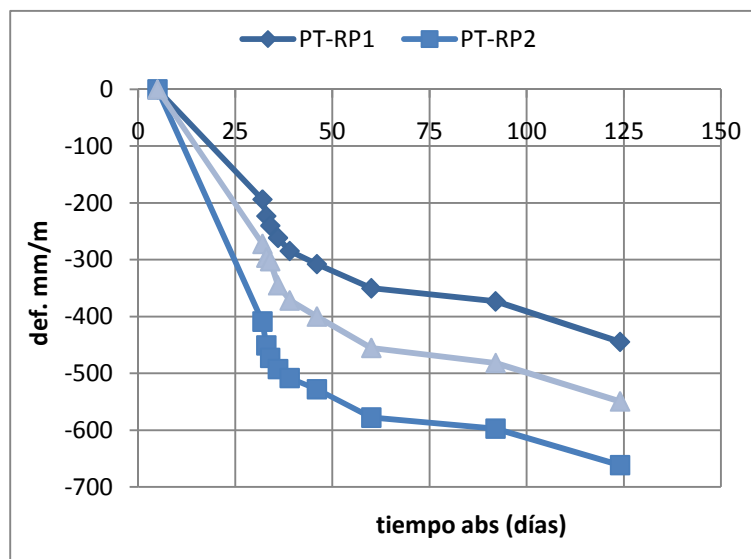


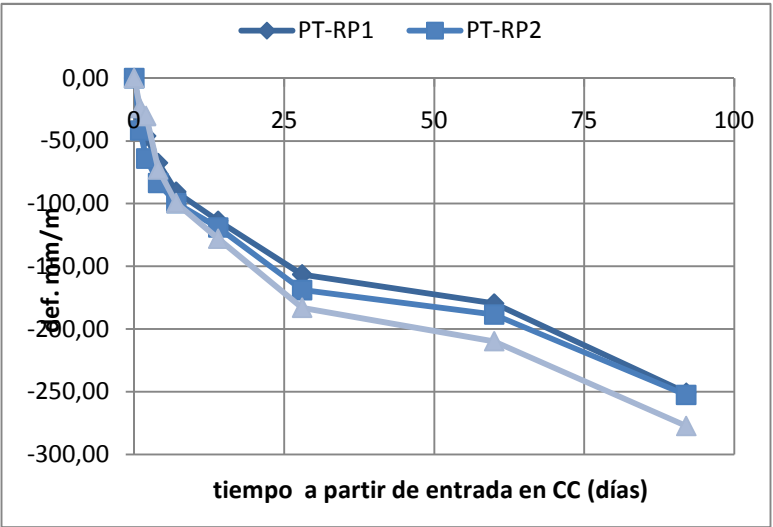
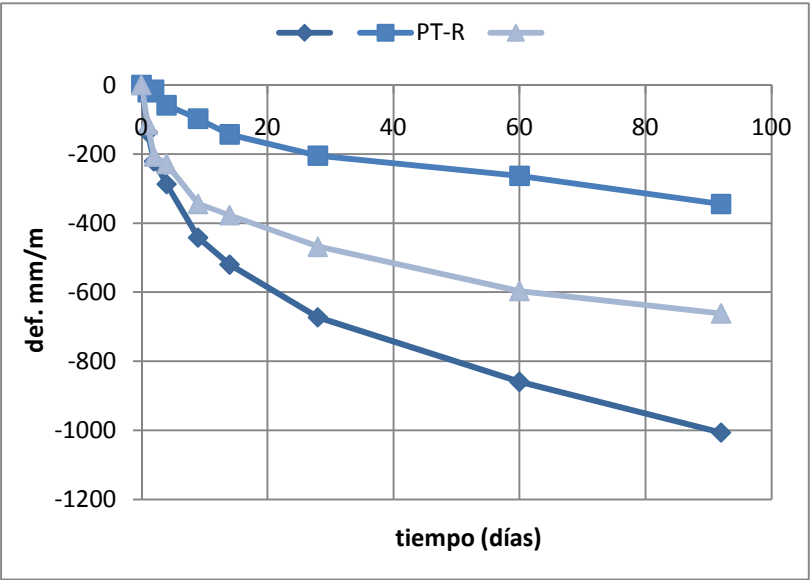
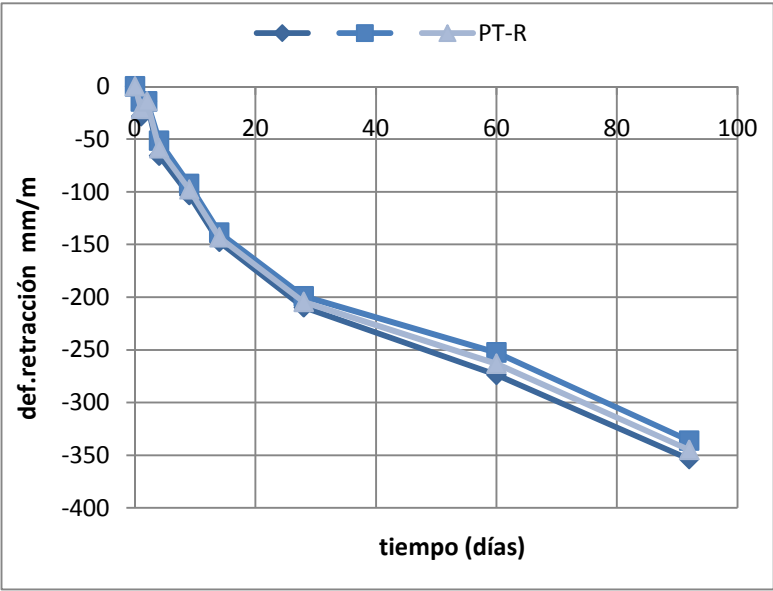
Anejo C

En el presente Anejo se muestran los resultados parciales primero para la dosificación PT y en segundo lugar para la dosificación FL de los ensayos de retracción y fluencia. Así como las

Temperatura					20	21	20	20	20	20	20	20	
Fecha			11/2	16/2	15/3	16/3	17/3	19/3	22/3	29/3	12/4	14/5	15/6
Hora				16:30	11:00	9:30	12:00	11:15	17:00	11:40	13:39	12:47	14:41
			Fab.		Entrada cc								
Edad				5	32	33	34	36	39	46	60	92	124
Tiempo inicio retracción					0,00	1,00	2,00	4,00	7,00	14,00	28,00	60,00	92,00
PT-RP1	Retracción	A		0,008	-0,036	-0,046	-0,049	-0,052	-0,056	-0,058	-0,066	-0,074	-0,087
		B		0,001	-0,026	-0,028	-0,031	-0,038	-0,043	-0,048	-0,057	-0,058	-0,072
		C		0,011	-0,027	-0,033	-0,035	-0,037	-0,041	-0,047	-0,054	-0,058	-0,071
		media		0,007	-0,030	-0,035	-0,038	-0,042	-0,047	-0,051	-0,059	-0,063	-0,077
		mm/m		0,000	-193,778	-223,111	-240,000	-261,333	-284,444	-307,556	-350,222	-373,333	-444,444
		mm/m			0,000	-29,333	-46,222	-67,556	-90,667	-113,778	-156,444	-179,556	-250,667
	Masa	kg		12,608	12,385	12,350	12,333	12,321	12,307	12,283	12,253	12,223	12,194
		variación gr		0,000	-223,000	-257,500	-274,500	-287,000	-301,000	-324,500	-355,000	-384,500	-413,500
PT-RP2	Retracción	A		0,009	-0,013	-0,023	-0,024	-0,029	-0,033	-0,035	-0,045	-0,051	-0,058
		B		0,018	-0,033	-0,042	-0,047	-0,052	-0,054	-0,059	-0,070	-0,073	-0,085
		C		0,066	-0,091	-0,097	-0,102	-0,103	-0,106	-0,110	-0,117	-0,119	-0,136
		media		0,031	-0,046	-0,054	-0,058	-0,061	-0,064	-0,068	-0,077	-0,081	-0,093
		mm/m		0,000	-408,889	-450,667	-472,889	-492,444	-508,444	-528,000	-577,778	-597,333	-661,333
	masa				0,000	-41,778	-64,000	-83,556	-99,556	-119,111	-168,889	-188,444	-252,444
		kg		12,615	12,372	12,345	12,330	12,320	12,307	12,285	12,256	12,227	12,200
		variación gr		0,000	-243,500	-269,750	-285,000	-295,500	-308,000	-330,500	-359,500	-388,000	-415,500
PT-RP3	Retracción	A		0,010	-0,022	-0,031	-0,028	-0,041	-0,047	-0,053	-0,064	-0,068	-0,085
		B		0,017	-0,045	-0,047	-0,050	-0,055	-0,061	-0,064	-0,076	-0,082	-0,092
		C		0,019	-0,040	-0,044	-0,046	-0,052	-0,055	-0,062	-0,070	-0,075	-0,086
		media		0,015	-0,036	-0,040	-0,041	-0,049	-0,054	-0,060	-0,070	-0,075	-0,088
		mm/m		0,000	-272,000	-296,000	-302,222	-344,889	-371,556	-400,000	-455,111	-481,778	-549,333
		mm/m			0,000	-24,000	-30,222	-72,889	-99,556	-128,000	-183,111	-209,778	-277,333
	masa	kg		12,352	12,115	12,084	12,071	12,060	12,046	12,023	11,992	11,964	11,935
		variación gr		0,000	-237,000	-268,000	-281,000	-292,500	-306,000	-329,500	-360,000	-388,500	-417,000
PT	Retracción	mm/m		0,000	-291,556	-323,259	-338,370	-366,222	-388,148	-411,852	-461,037	-484,148	-551,704
		C.V		0,00%	-37,34%	-35,95%	-35,64%	-31,95%	-29,09%	-0,78%	-0,60%	-0,45%	-0,32%
		mm/m			0,000	-31,704	-46,815	-74,667	-96,593	-120,296	-169,481	-192,593	-260,148
		C.V			0,00%	-28,78%	-36,09%	-10,91%	-5,31%	-5,97%	-7,87%	-8,06%	-5,73%
	masa	variació %		0,000	-234,500	-265,083	-280,167	-291,667	-305,000	-328,167	-358,167	-387,000	-415,333
		C.V		0,00%	-4,47%	-2,50%	-1,89%	-1,48%	-1,18%	-0,98%	-0,77%	-0,56%	-0,42%

Temperatura				20	18	20	20	20	20	20	20	20
Fecha			15/3	15/3	16/3	17/3	19/3	24/3	29/3	12/4	14/5	15/6
Hora			13:30	11:00	9:30	12:00	11:15	17:45	11:45	13:00	12:47	14:41
			Antes carga	Final carga								
Edad			32	32	33	34	36	41	46	60	92	124
Tiempo inicio retracción				0,00	1,00	2,00	4,00	9,00	14,00	28,00	60,00	92,00
PT-FR1	Fluencia + Retracción	A	-0,065	-0,107	-0,158	-0,173	-0,195	-0,224	-0,230	-0,271	-0,301	-0,329
		B	0,006	-0,054	-0,068	-0,082	-0,090	-0,112	-0,129	-0,153	-0,180	-0,209
		C	-0,004	-0,074	-0,104	-0,115	-0,131	-0,164	-0,180	-0,213	-0,248	-0,279
		mitjana	-0,021	-0,078	-0,110	-0,123	-0,139	-0,167	-0,180	-0,212	-0,243	-0,272
		mm/m	0,000	-305,778	-474,667	-545,778	-627,556	-776,889	-846,222	-1020,444	-1184,000	-1340,444
		mm/m		0,000	-168,889	-240,000	-321,778	-471,111	-540,444	-714,667	-878,222	-1034,667
PT-FR2	Fluencia + Retracción	A	0,007	-0,090	-0,111	-0,133	-0,148	-0,178	-0,197	-0,221	-0,280	-0,304
		B	0,071	0,029	0,017	0,005	-0,004	-0,025	-0,037	-0,062	-0,080	-0,103
		C	-0,008	-0,067	-0,093	-0,114	-0,118	-0,157	-0,175	-0,200	-0,241	-0,271
		mitjana	0,023	-0,043	-0,062	-0,081	-0,090	-0,120	-0,136	-0,161	-0,200	-0,226
		mm/m	0,000	-352,000	-456,889	-554,667	-604,444	-764,444	-851,556	-983,111	-1192,889	-1329,778
		mm/m		0,000	-104,889	-202,667	-252,444	-412,444	-499,556	-631,111	-840,889	-977,778
PT-FR		mm/m		0,000	-136,889	-221,333	-287,111	-441,778	-520,000	-672,889	-859,556	-1006,222
		C.V		0,0%	-33,1%	-11,9%	-17,1%	-9,4%	-5,6%	-8,8%	-3,1%	-4,0%
PT-R1	Retracción	A		-0,039	-0,047	-0,045	-0,056	-0,058	-0,065	-0,079	-0,090	-0,103
		B		-0,096	-0,104	-0,102	-0,112	-0,122	-0,132	-0,143	-0,155	-0,170
		C		-0,008	-0,008	-0,004	-0,012	-0,021	-0,029	-0,039	-0,052	-0,069
		mitjana		-0,048	-0,053	-0,050	-0,060	-0,067	-0,075	-0,087	-0,099	-0,114
		mm/m		0,000	-28,444	-14,222	-65,778	-103,111	-147,556	-209,778	-273,778	-353,778
PT-R2		A		0,045	0,044	0,044	0,037	0,029	0,021	0,010	-0,001	-0,017
		B		-0,005	-0,009	-0,009	-0,017	-0,021	-0,030	-0,039	-0,048	-0,063
		C		0,009	0,006	0,006	0,000	-0,011	-0,020	-0,034	-0,044	-0,060
		mitjana		0,016	0,014	0,014	0,007	-0,001	-0,010	-0,021	-0,031	-0,047
		mm/m		0,000	-14,222	-14,222	-51,556	-92,444	-138,667	-199,111	-252,444	-336,000
PT-R		mm/m		0,000	-21,333	-14,222	-58,667	-97,778	-143,111	-204,444	-263,111	-344,889
		C.V		0,0%	-47,1%	0,0%	-17,1%	-7,7%	-4,4%	-3,7%	-5,7%	-3,6%
		mm/m		0,000	-115,556	-207,111	-228,444	-344,000	-376,889	-468,444	-596,444	-661,333





Temperatura			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Fecha		23/2	22/3	23/3	24/3	26/3	29/3	6/4	19/4	21/5	20/6	
Hora		16:30	17:00	17:00	16:30	11:45	17:00	13:14	16:30	14:07	9:39	
		Inicio puntos	Entrada cc									
Edad		4	32	33	34	36	39	47	60	92	122	
Tiempo inicio retracción			0	1	2	4	7	15	28	60	90	
FL-RP1	retracción	A	-0,001	-0,013	-0,013	-0,008	-0,014	-0,023	-0,052	-0,057	-0,062	-0,072
		B	0,169	0,157	0,164	0,161	0,153	0,155	0,132	0,112	0,102	0,093
		C	0,003	0,000	-0,002	-0,004	-0,010	-0,014	-0,028	-0,038	-0,057	-0,064
		media	0,057	0,048	0,050	0,050	0,043	0,039	0,017	0,006	-0,006	-0,014
		μm/m	0,000	-48,000	-39,111	-39,111	-74,667	-94,222	-211,556	-273,778	-334,222	-380,444
				0,000	8,889	8,889	-26,667	-46,222	-163,556	-225,778	-286,222	-332,444
	masa	kg	12,3915	12,4060	12,2780	12,2430	12,2040	12,1660	12,1080	12,058	12,005	11,969
		variación gr	0,000	14,500	-113,500	-148,500	-187,500	-225,500	-283,500	-333,500	-386,500	-423,000
FL-RP2	Retracción	A	-0,018	0,006	0,001	-0,011	-0,018	-0,028	-0,044	-0,058	-0,067	-0,076
		B	0,012	0,027	0,026	0,014	0,011	-0,004	-0,021	-0,039	-0,047	-0,053
		C	-0,044	-0,049	-0,051	-0,057	-0,057	-0,060	-0,075	-0,081	-0,109	-0,102
		media	-0,017	-0,005	-0,008	-0,018	-0,021	-0,031	-0,047	-0,059	-0,074	-0,077
		μm/m	0,000	60,444	46,222	-7,111	-24,889	-74,667	-160,000	-227,556	-307,556	-321,778
				0,000	-14,222	-67,556	-85,333	-135,111	-220,444	-288,000	-368,000	-382,222
	masa	kg	12,5545	12,5510	12,4270	12,3940	12,3570	12,3210	12,2665	12,2185	12,1675	12,1330
		variación gr	0,000	-3,500	-127,500	-160,500	-197,500	-233,500	-288,000	-336,000	-387,000	-421,500
H2-RP3	Retracción	A	-0,004	-0,027	-0,018	-0,019	-0,021	-0,037	-0,051	-0,066	-0,076	-0,083
		B	-0,021	-0,029	-0,037	-0,037	-0,044	-0,048	-0,060	-0,071	-0,091	-0,096
		C	-0,005	-0,004	-0,011	-0,015	-0,018	-0,021	-0,034	-0,045	-0,055	-0,064
		media	-0,010	-0,020	-0,022	-0,024	-0,028	-0,035	-0,048	-0,061	-0,074	-0,081
		μm/m	0,000	-53,333	-64,000	-72,889	-94,222	-135,111	-204,444	-270,222	-341,333	-378,667
				0,000	-10,667	-19,556	-40,889	-81,778	-151,111	-216,889	-288,000	-325,333
	masa	kg	12,6155	12,5960	12,4760	12,4400	12,4090	12,3745	12,3210	12,275	12,224	12,190
		variación gr	0,000	-19,500	-139,500	-175,500	-206,500	-241,000	-294,500	-340,500	-391,500	-426,000
FL	Retracción	μm/m	0,000	-13,630	-18,963	-39,704	-64,593	-101,333	-192,000	-257,185	-327,704	-360,296
		C.V	0,00%	-471,07%	-304,84%	-82,85%	-55,34%	-30,44%	-2,88%	-1,38%	-0,84%	-0,64%
		μm/m		0,000	-5,333	-26,074	-50,963	-87,704	-178,370	-243,556	-314,074	-346,667
		C.V		0,00%	-233,33%	-148,18%	-60,05%	-51,01%	-20,72%	-15,91%	-14,87%	-8,94%
	masa	variación %	0,000	-2,833	-126,833	-161,500	-197,167	-233,333	-288,667	-336,667	-388,333	-423,500
		C.V	0,00%	-600,35%	-10,26%	-8,38%	-4,82%	-3,32%	-1,92%	-1,05%	-0,71%	-0,54%

Temperatura				20	20	20	20	20	20	20	20	20
Fecha			22/3	22/3	23/3	24/3	26/3	29/3	6/4	19/4	21/5	29/6
Hora			16:20	17:00	17:00	16:30	11:45	17:45	13:14	16:30	14:07	9:39
			Antes Carga	Final Carga								
Edad			32	32	33	34	36	39	47	60	92	122
Tiempo Inicio Fluencia			0	0	1	2	4	7	15	28	60	90
FL-FR1	Fluencia + Retracción	A	0,001	-0,075	-0,113	-0,130	-0,152	-0,173	-0,215	-0,259	-0,309	-0,336
		B	-0,030	-0,096	-0,142	-0,151	-0,178	-0,203	-0,240	-0,286	-0,337	-0,364
		C	-0,018	-0,081	-0,106	-0,122	-0,138	-0,159	-0,199	-0,234	-0,283	-0,308
		media	-0,016	-0,084	-0,120	-0,134	-0,156	-0,178	-0,218	-0,260	-0,310	-0,336
		μm/m	0,000	-364,444	-558,222	-632,889	-748,444	-867,556	-1079,111	-1301,333	-1568,000	-1708,444
		μm/m		0,000	-193,778	-268,444	-384,000	-503,111	-714,667	-936,889	-1203,556	-1344,000
FL-FR2	Fluencia + Retracción	A	-0,045	-0,114	-0,151	-0,169	-0,195	-0,219	-0,259	-0,306	-0,356	-0,380
		B	0,007	-0,073	-0,129	-0,138	-0,175	-0,201	-0,243	-0,295	-0,358	-0,383
		C	0,240	0,178	0,144	0,129	0,105	0,084	0,043	0,006	-0,041	-0,061
		mediaa	0,067	-0,003	-0,045	-0,059	-0,088	-0,112	-0,153	-0,198	-0,252	-0,275
		μm/m	0,000	-375,111	-600,889	-675,556	-830,222	-956,444	-1175,111	-1416,889	-1701,333	-1824,000
		μm/m		0,000	-225,778	-300,444	-455,111	-581,333	-800,000	-1041,778	-1326,222	-1448,889
FL-FR		μm/m		0,000	-209,778	-284,444	-419,556	-542,222	-757,333	-989,333	-1264,889	-1396,444
		C.V		0,0%	-10,8%	-8,0%	-12,0%	-10,2%	-8,0%	-7,5%	-6,9%	-5,3%
FL-R1	Retracción	A		-0,009	-0,007	-0,011	-0,020	-0,023	-0,034	-0,048	-0,066	-0,077
		B		0,001	0,000	-0,005	-0,008	-0,014	-0,028	-0,040	-0,055	-0,062
		C		-0,016	-0,018	-0,023	-0,028	-0,032	-0,047	-0,058	-0,069	-0,082
		media		-0,008	-0,008	-0,013	-0,019	-0,023	-0,036	-0,049	-0,063	-0,074
		μm/m		0,000	-1,778	-26,667	-56,889	-80,000	-151,111	-216,889	-295,111	-350,222
FL-R2	Retracción	A		0,001	0,001	-0,006	-0,013	-0,014	-0,028	-0,041	-0,057	-0,069
		B		-0,006	-0,014	-0,019	-0,026	-0,030	-0,045	-0,055	-0,073	-0,081
		C		-0,012	-0,016	-0,020	-0,026	-0,029	-0,043	-0,056	-0,068	-0,082
		media		-0,006	-0,010	-0,015	-0,022	-0,024	-0,039	-0,051	-0,066	-0,077
		μm/m		0,000	-21,333	-49,778	-85,333	-99,556	-176,000	-240,000	-321,778	-382,222
FL-R		μm/m		0,000	-11,556	-38,222	-71,111	-89,778	-163,556	-228,444	-308,444	-366,222
		C.V		0,0%	-119,7%	-42,8%	-28,3%	-15,4%	-10,8%	-7,2%	-6,1%	-6,2%
FL	Fluencia	μm/m		0,000	-198,222	-246,222	-348,444	-452,444	-593,778	-760,889	-956,444	-1030,222

